

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra výrobních systémů

Obor: Výrobní systémy

Zaměření: Pružné výrobní systémy pro strojírenskou výrobu

**ANALÝZA PŘESNOSTI 3D DIGITALIZACE S VYUŽITÍM OPTICKÝCH
SKENERŮ**

**THE ACCURACY ANALYSIS OF 3D DIGITIZATION WITH THE USAGE OF
OPTICAL SCANNERS**

KVS – VS – 232

Bc. Miroslav Hofman

Vedoucí práce: Ing. Radomír Mendřický, Ph.D.

Konzultant práce: Ing. Petr Keller, Ph.D.

Počet stran : 77

Počet příloh : 6

Počet obrázků : 43

Počet tabulek : 4

Počet modelů

nebo jiných příloh : 0

V Liberci 23. 5. 2013

TÉMA: ANALÝZA PŘESNOSTI 3D DIGITALIZACE S VYUŽITÍM OPTICKÝCH SKENERŮ

ANOTACE: Diplomová práce se zabývá analýzou přesnosti snímání bezkontaktních optických skenerů ATOS II 400 a RevScan. Rešeršní část uvádí rozbor metod využívaných při 3D skenování. Její součástí je také popis principů optického bezkontaktního skenování. V části praktické je provedena analýza přesnosti snímání použitých skenerů. Ta spočívá v porovnání digitalizovaných a skutečných rozměrů a tvarů na navrženém měřicím etalonu, kdy určení skutečných hodnot proběhlo pomocí SMS. Na základě výsledků analýzy je pro oba skenery provedeno porovnání zkoumaných hledisek přesnosti spolu se schopností skenerů zachytit detailní prvky.

THEME: THE ACCURACY ANALYSIS OF 3D DIGITIZATION WITH THE USAGE OF OPTICAL SCANNERS

ANNOTATION: Diploma thesis deals with the analysis of the scanning accuracy of non-contact optical scanners ATOS II 400 and RevScan. The search section provides an analysis of the methods used in 3D scanning. It also includes a description of the principles of non-contact optical scanning. The practical part is an analysis of the scanning accuracy of the scanners. This involves comparing the real and digitized dimensions and shapes on the proposed measuring etalon when the determination of the real values is held by means of CMM. Based on the analysis results, for both scanners is carried out a comparison of studied aspects of the accuracy along with the ability of scanners to capture detailed elements.

Desetinné třídění : 62

Klíčová slova : SKENER, PŘESNOST, DIGITALIZACE, ATOS, REVSCAN

Zpracovatel : TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů

Dokončeno : 2013

Archivní označení zprávy :

Počet stran : 77

Počet příloh : 6

Počet obrázků : 43

Počet tabulek : 4

Počet modelů

nebo jiných příloh : 0

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Radomíru Mendřickému, Ph.D. za cenné rady, ochotu a pomoc s výzkumem i se zpracováním celé práce.

Dále děkuji panu Ing. Petru Kellerovi, Ph.D. za ochotu pomoci a poradit při psaní této diplomové práce.

Poděkování náleží také mým rodičům a celé rodině za poskytnutou podporu a důvěru v průběhu dosavadního studia.

Obsah

Obsah	6
Seznam použitých zkratk a symbolů	8
1 ÚVOD.....	9
2 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	9
3 3D DIGITALIZACE - PROSTŘEDEK REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ....	10
3.1 Reverzní inženýrství.....	10
3.2 Digitalizace 3D skenery	11
3.2.1 Základní pojmy v oblasti 3D skenování	12
3.3 Optická digitalizace.....	13
3.3.1 Principy optického měření souřadnic snímaných bodů	13
4 ROZBOR METOD 3D SKENOVÁNÍ.....	17
4.1 Nedestruktivní bezdotykové skenování	17
4.1.1 Optické skenování.....	17
4.1.2 Laserové skenování.....	22
4.1.3 Ultrazvukové skenování	23
4.1.4 CT (rentgenové) skenování.....	23
4.2 Nedestruktivní dotykové skenování.....	24
4.2.1 Skenování mechanickými rameny	24
4.2.2 Skenování na souřadnicových měřicích strojích	25
4.3 Destruktivní skenery	27
5 CHYBY A NEJISTOTY MĚŘENÍ.....	28
5.1 Chyby měření	28
5.1.1 Chyby hrubé.....	28
5.1.2 Chyby systematické	28
5.1.3 Chyby náhodné	29
5.2 Nejistoty měření	30
6 GOM INSPECT	32

6.1	Měření rozměrů v prostředí inspekčního softwaru	32
6.2	Určení geometrických tolerancí v prostředí inspekčního softwaru.....	35
7	ANALÝZA PŘESNOSTI OPTICKÉ 3D DIGITALIZACE.....	36
7.1	Návrh měřicího etalonu.....	37
7.1.1	Popis analyzovaných rozměrů a prvků etalonu	38
7.2	Návrh skenovacího přípravku	41
7.3	Výroba etalonů	41
7.4	Měření na souřadnicovém měřicím stroji	42
7.4.1	Vyhodnocení naměřených hodnot	43
7.5	Skenování etalonu a průběh inspekce naskenovaných dat.....	44
7.5.1	Skenování skenerem ATOS II	45
7.5.2	Skenování skenerem RevScan	49
7.6	Limity skenování detailních prvků.....	50
7.6.1	Žebra	51
7.6.2	Drážky.....	52
7.6.3	Válce	54
7.6.4	Otvory	55
7.6.5	Shrnutí výsledků prověření limitů skenování detailů	58
7.7	Vyhodnocení rozměrové inspekce naskenovaných dat.....	59
7.7.1	Výsledky měření roztečí kulových prvků.....	60
7.7.2	Výsledky měření délkových rozměrů	62
7.7.3	Výsledky měření průměrů válců.....	64
7.7.4	Výsledky měření průměrů otvorů	67
7.7.5	Shrnutí výsledků rozměrové inspekce	69
7.8	Vyhodnocení inspekce tvaru a směru naskenovaných dat.....	71
8	ZÁVĚR	74
	Seznam použité literatury	75
	Seznam příloh	77

Seznam použitých zkratek a symbolů

2D (two-dimensional)	dvourozměrný
3D (three-dimensional)	trojrozměrný
CAD (computer aided design)	počítačová podpora konstrukce
CAM (computer aided manufacturing)	počítačová podpora výroby
CCD (charge-coupled device)	zařízení s vázanými náboji
CNC (computerized numerical control)	číslicově řízený počítačem
CT (computed tomography)	počítačová tomografie
FEM (finite element method)	metoda konečných prvků
NC (numerical control)	číslicově řízený
SMS	souřadnicový měřicí stroj
STL (stereolithography)	výstupní formát dat ze 3D skenování

1 ÚVOD

Dvakrát měř, jednou řež praví staré české pořekadlo. Význam těchto čtyř slov má primárně vyjadřovat výchovný prostředek nabádající posluchače k rozmyšlení svého jednání. Ovšem je známo, že má svůj původ ve zkušenosti předchozích generací, které už velmi dobře věděli, že proces měření je důležitý a nesmí se podcenit.

V dnešní době to platí dvojnásob. Průmyslová výroba by bez užívání metrologických postupů v silném konkurenčním prostředí neuspěla. Proto je nezbytné, aby každý výrobní podnik měl útvar věnující se této problematice. Tak jako ve všech odvětvích, tak i v oblasti měření a kontroly je možné získat konkurenční výhodu používáním nejmodernějších zařízení. Mezi tato zařízení se řadí 3D skenery, které umožní nejen měření součástí, ale mohou být také prostředkem pro tvorbu jejich technické dokumentace. Jednotlivé druhy skenerů se pak liší podle principu jejich práce, a zejména přesností, s jakou dokáží měřit. Ta je jedním z hlavních parametrů u volby skenovacího zařízení při možnosti výběru z několika zástupců. Výrobci skenerů jsou si tohoto faktu vědomi a snaží se přesnost neustále zlepšovat.

Společnosti vyrábějící 3D skenery ověřují přesnost svých zařízení ve speciálních metrologických laboratořích na etalonech ideálních tvarů, jako jsou např. soustavy koulí. Nicméně při použití skeneru v běžné průmyslové praxi zřídka dosáhneme takto zjištěných hodnot přesností, zejména z důvodů rušení a měnících se podmínek okolí jako je např. teplota, vibrace či světelné podmínky. Bylo by tedy vhodné analyzovat, s jakou přesností dokáží skenery pracovat při použití v běžné praxi, tedy v nelaboratorním prostředí při snímání reálných ploch rozličných tvarů.

2 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

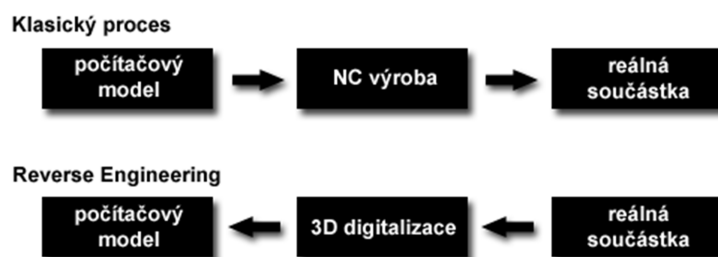
Úkolem první části diplomové práce je provést rozbor metod používaných při prostorovém snímání objektů a popis principů optického bezkontaktního snímání. Hlavní cíl práce spočívá v provedení analýzy přesnosti snímání optických skenerů ATOS II 400 a RevScan. Analýza bude uskutečněna skrze porovnání rozměrů prvků na navrženém měřicím etalonu a na jeho digitalizovaném modelu. Její výstup by měl obsahovat porovnání výsledků analyzované přesnosti snímání pro jednotlivá zařízení a stanovení limitů schopnosti skenerů zachytit detailní prvky.

3 3D DIGITALIZACE - PROSTŘEDEK REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ

3.1 Reverzní inženýrství

Pod pojmem reverzní (zpětné) inženýrství se skrývá postup získávání technologických principů určitého zařízení nebo systému na základě analýzy jeho funkce, struktury a operace. Výsledkem je poté vytvoření podobného, nebo podobně pracujícího zařízení či systému. Svůj původ má ve vojenské sféře. Převážně ve válečných obdobích bylo strategicky výhodné osvojit si cizí výrobky (zbraně a válečné stroje). Jejich demontáží a analýzou byly mocnosti schopné technologii „zkopírovat“ a snížit tak čas vývoje. Podobný postup byl, a dodnes bohužel je, využíván i v průmyslových špionážích, které vedou ke krádežím nápadů konkurenčních výrobců.

Zcela legálně je reverzní inženýrství v technických oborech využíváno především k doplnění ztracené či neúplné dokumentace výrobku. Dále pak pro získání digitálního prostorového modelu, který je možno využít k mnoha aplikacím, často pak k inspekcím tvaru a rozměru objektů a dalšího zpracování v CAM a CAE. Postup reverzního inženýrství tedy tvoří protiklad ke klasickému procesu. Na jeho začátku je k dispozici reálný díl, který se převádí do digitální podoby. [2, 27]



Obr. 1: Princip reverzního inženýrství [27]

Neméně důležité je využití zpětného inženýrství v medicínské praxi. Každé lidské tělo je jedinečné a jednotlivé jeho části se od sebe liší v malých i velkých detailech. Z toho důvodu je reverzní inženýrství používáno k digitalizaci okolí poraněné oblasti za účelem vytvoření dokonale padnoucí náhrady, např. pro zrekonstruování části lidské lebky pacientů po vážných nehodách. Dále je hojně využíváno při konstrukci kloubních náhrad.

3.2 Digitalizace 3D skenery

Když se řekne skener, asi každému se vybaví dnes již zcela běžné kancelářské zařízení k převodu dokumentu z tištěné do digitální podoby. Nejčastěji za účelem dalšího zpracování takto vzniklého souboru či pouze k záloze. Z této myšlenky vychází i princip průmyslově využívaných skenerů, které nesnímají dokumenty, ale objekty. Tato zařízení jsou schopná rekonstruovat fyzický objekt do digitální podoby (digitalizovat ho), čímž vzniká prostorový model snímaného objektu. Proto jsou tato zařízení označována jako 3D skenery. Skenování probíhá v diskrétních bodech na povrchu objektu, při kterém se získávají informace o jejich poloze v prostoru. Vzniká tak množina bodů, jež interpretuje digitalizovaný tvar povrchu objektu. Ta je dále softwarově zpracována k získání objemového modelu. Některá zařízení dokáží nasnímat i barvu či texturu povrchu. [3, 1]

Naskenovaná data mají velmi mnoho využití [4]:

- Pro účely inspekčních činností, porovnání s CAD modelem
- K rekonstrukci 3D dat nástrojů a forem po ručních úpravách
- K získání 3D dat pro porovnávací analýzy
- Pro archivní účely (architektura, stavebnictví, umění ...)
- Pro lékařské účely (zubní a plastická chirurgie), atd.



Obr. 2: Využití 3D skeneru pro archivaci umění [5]

3.2.1 Základní pojmy v oblasti 3D skenování

Přesnost a rozlišitelnost

Význam slov přesnost a rozlišitelnost není stejný. Přesností se rozumí hodnota, která je dána rozdílem skutečné a naměřené hodnoty. Zatímco rozlišitelností se nazývá nejkratší možná vzdálenost, jakou dané zařízení dokáže změřit. Aby bylo možno porovnávat přesnosti jednotlivých optických zařízení od různých výrobců, bylo zavedeno doporučení VDI 2634. Toto doporučení se vyznačuje jednotnými parametry přesnosti optických systémů. [4]

Měřicí objem

Měřicí objem představuje měřicí rozsah užitý při jednom záběru či sekvenci záběrů. Je to tedy ohraničený prostor definovaný souřadnicemi x, y, z, ve kterém je možno provést digitalizaci. V dnešní době již skenery umí jednotlivá měření na sebe napojovat a měřit tak teoreticky libovolné plochy. Tato výhoda bývá vykoupena na úkor přesnosti, která se mnohdy ztrácí v místě napojení. [4]

Rychlost skenování

Rychlost je u většiny zařízení definována počtem sejmutých bodů za sekundu. [4]

Mrak bodů

Z anglického spojení slov point cloud data je odvozen název pro rozsáhlou množinu bodů definující povrch objektu. Definice je interpretována prostřednictvím kartézských souřadnic (x, y, z) vzhledem k určitému počátku. [4] Mrak bodů, který je výstupní veličinou procesu prostorové digitalizace, většinou není použitelný ve většině 3D aplikací. Z toho důvodu je povrch převeden na polygonální či trojúhelníkovou síť, NURBS křivky a další. Samotný mrak bodů je možno použít v průmyslové metrologii a inspekci. Konkrétněji dochází k vzájemnému ustavení mraku bodů a např. CAD modelu (nebo jiného mraku bodů) za účelem jejich vzájemného porovnání a kontroly rozměru a tvaru. Rozdíly jsou poté zobrazovány pomocí barevné mapy. [6]

3.3 Optická digitalizace

V kapitole optické digitalizace jsou zmíněny důležité pojmy z teorie vyhodnocení 3D obrazu snímaného pomocí bezkontaktních optických skenerů. Uvedené problematice je v práci vymezen zvláštní prostor z důvodů použití optických zařízení v praktické části.

3.3.1 Principy optického měření souřadnic snímaných bodů

Zařízení snímající prostorové objekty musí být schopna zjistit informaci o hloubce již získaného 2D obrazu, např. z kamery s CCD čipy. Při navrhování jednotlivých technik prostorového snímání se vycházelo z lidského vnímání prostoru, především souřadnice z (hloubky). Tu lidský mozek vyhodnocuje např. na základě pozorování hýbajících se těles a stínů snímaných objektů. Nejdůležitější faktor při rozeznávání prostoru je ovšem dvojí snímání objektu z různých úhlů a jejich následné spojení, které v lidském těle obstarávají oči a mozek. [7]

A. Fotogrammetrie

Cílem fotogrammetrie je rekonstrukce rozměrů, tvaru a polohy objektu zachyceného na fotografii. Rekonstrukce může být provedena dvěma způsoby. Při prvním jsou známy parametry fotoaparátu jako např. ohnisková vzdálenost spolu s vnitřní orientací snímku, či některé parametry snímaného objektu. Rekonstrukce objektu je pak provedena přímo. V praxi častěji nastává případ, kdy je vnitřní orientace neznámá. Poté se musí určit pozice snímků při fotografování - vnější orientace. Toho je docíleno zjištěním určitých parametrů z fotografie, jako je např. horizont, odchylka roviny apod.

Fotogrammetrie využívá pro definování souřadnic rekonstruovaných objektů tři základní metody, označené podle nezbytného počtu vyhodnocovaných snímků. Jsou to metody jednosnímková, dvojsnímková a průseková. [8]

- **Jednosnímková** – Slouží k rekonstrukci rovinných objektů, kterými jsou např. nástěnné malby.

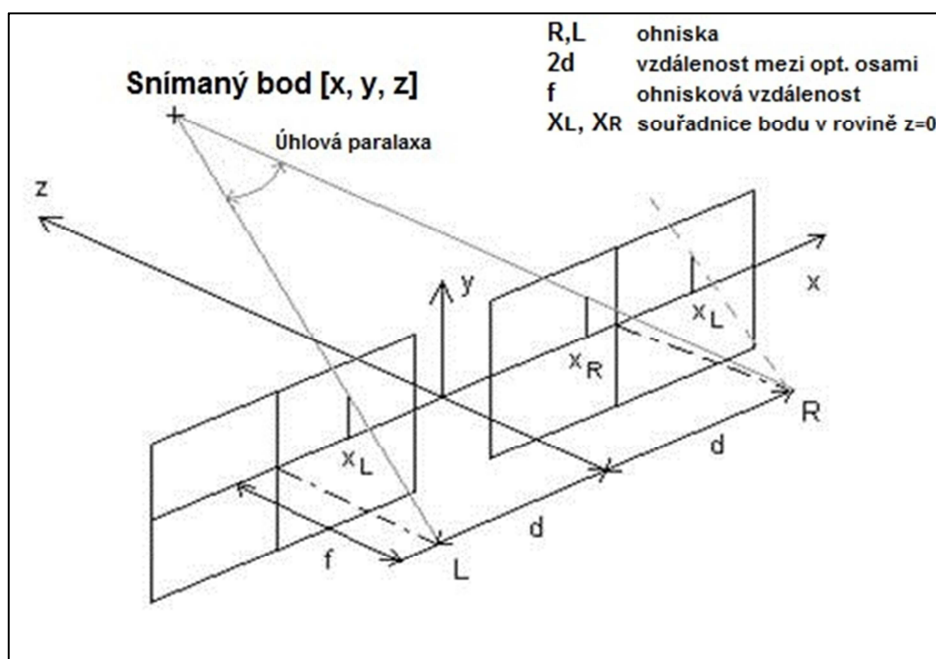
- **Dvojsnímková** – S dvojsnímkovou fotogrammetrií je pracováno v případech vyhodnocování prostorových objektů. Při její aplikaci dochází k vyvolání umělého stereoskopického efektu prolnutím dvou fotografií zkoumaného objektu pořízených z různých úhlů. Princip stereoefektu je nastíněn v následující kapitole věnující se pasivní triangulaci.
- **Průseková** – Poslední metoda je využívána zejména při rekonstruování tvarově složitých 3D objektů. Vyhodnocení se uskutečňuje na základě identifikace bodů zachycených na souboru fotografií, kdy jednotlivé snímky byly pořízeny z různých pozic a úhlů. [8]

B. Pasivní triangulace

Slovo pasivní v tomto případě vyjadřuje fakt, že se při určování souřadnic bodů nevychází z geometricky uspořádaného osvětlení. U technik pasivní triangulace se operuje s metodami fotogrammetrického snímání pomocí několika kamer ve známé poloze, či samokalibračních kamer. U snímání samokalibračními kamerami nemusí být jejich pozice známá. Z pořízených snímků, na kterých je zachycen se snímaným objektem i kalibrační předmět, se vyhodnotí pozice kamer. Přesněji z natočení a změny měřítka kalibračního předmětu na jednotlivých fotografiích.

Velmi často je pracováno s technikou známou jako stereovidění využívající **stereoefektu**, stejného jako využívají lidské oči. Nutností je použití dvojice kamer s CCD snímači s rovnoběžnými optickými osami. Vzdálenost mezi snímači je konstantní a přibližná vzdálenosti lidských očí. Obě kamery sejmou stereoskopický snímek, každá tedy z jiné pozice. Snímky pak vzájemně tvoří perspektivní obrazy. V případě, že se snímaný bod nachází na obou perspektivních snímcích, je možné dle jednoduchých vztahů dopočítat všechny tři prostorové souřadnice. Velice důležitá je tzv. úhlová paralaxa, což je úhel, který je svírán oběma paprsky. [7]

$$x = x_L \cdot \frac{2 \cdot d}{x_L - x_R} \quad y = y_L \cdot \frac{2 \cdot d}{x_L - x_R} \quad z = \frac{2 \cdot d \cdot f}{x_L - x_R} - f \quad (1)$$



Obr. 3: Stereoskopické snímky [7]

Uvedený příklad slouží pouze pro ilustraci dané problematiky. Zmíněné vztahy (1) jsou platné v případě, že je souřadná osa z rovnoběžná s optickými osami kamer, dále jsou shodné ohniskové vzdálenosti obou kamer a současně jejich obrazové roviny leží v rovině, jejíž souřadnice je $z = 0$. V praxi se samozřejmě vyskytují složitější případy, které se zjednodušují pomocí korekcí. [7]

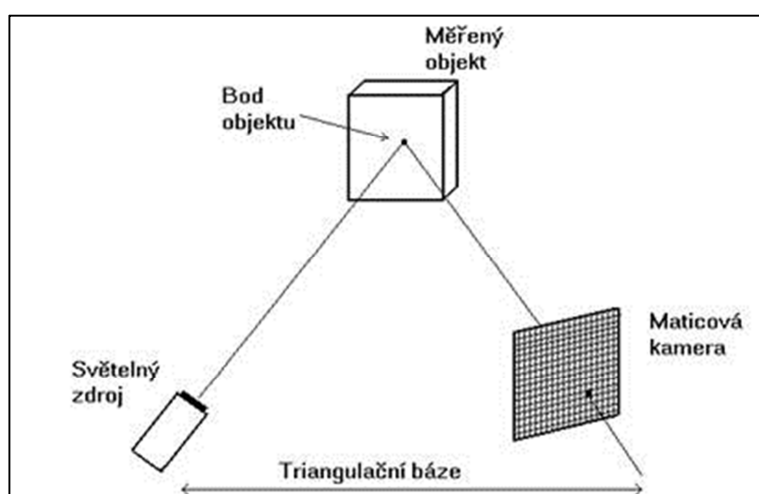
C. Aktivní triangulace

Princip této metody je založen na osvětlení objektu zdrojem světla a jeho současném snímání CCD snímačem, kdy probíhá fotogrammetrická rekonstrukce. Po osvětlení určitého bodu na objektu vzniká tzv. triangulační trojúhelník, který je tvořen snímačem, snímaným bodem a zdrojem světla. V trojúhelníku jsou poté důležité dva úhly, jejichž společné rameno tvoří triangulační báze (spojnice mezi snímačem a světelným zdrojem). První úhel je známý a má konstantní velikost. Je určen směrem světelného signálu, vycházejícího ze zdroje záření, a triangulační bází. Druhý úhel je proměnný a je dán sklonem dopadu paprsku na CCD snímač vůči bázi. Tento úhel a velikost triangulační báze umožňuje určit vzdálenost v ose z . Podle charakteru světelného paprsku lze definovat tři druhy aktivní triangulace.

1D – využívá světelný paprsek

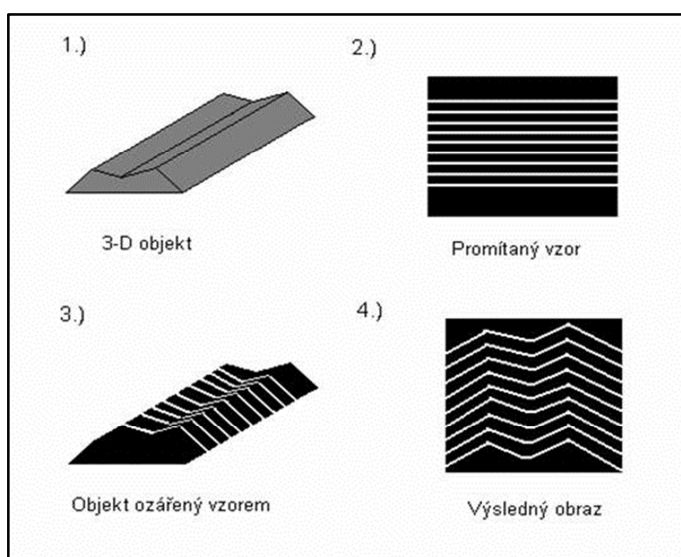
2D – využívá světelný proužek

3D – využívá soubor strukturovaného světelného svazku [7]



Obr. 4: Triangulační trojúhelník [7]

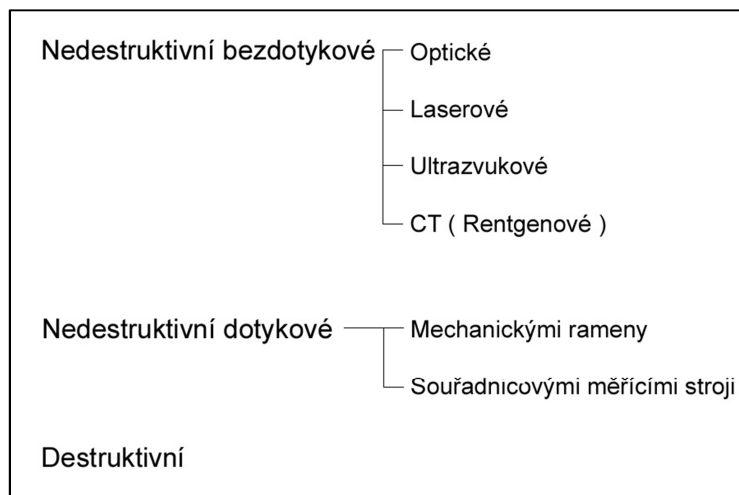
Často využívanou metodou snímání založenou na 3D aktivní triangulaci je tzv. Fringe projection (například u systému ATOS). Skenování probíhá tak, že je objekt osvětlen proudem světla z projektoru. Světlo prochází skrz rastr, který je součástí projektoru a vytváří tak na povrchu objektu shluk světlých a tmavých proužků. Tyto proužky se dle tvaru povrchu objektu, na který jsou promítány, různě deformují. Pruhy jsou následně z různých úhlů snímány zmíněnou dvojicí kamer s CCD čipem s vysokým rozlišením, které využívají stereoeffektu. Informace z kamer jsou dále zpracovány optickými zobrazovacími rovnicemi a dochází k výpočtu mraku prostorových bodů. [9]



Obr. 5: Fringe Projection [7]

4 ROZBOR METOD 3D SKENOVÁNÍ

Soubor metod pro trojrozměrné skenování je poměrně rozsáhlý. Jednotlivé metody se od sebe liší většinou principem digitalizace a konstrukčním provedením, přičemž každá z nich má své přednosti a omezení.



Obr. 6: Rozdělení 3D skenerů

4.1 Nedestruktivní bezdotykové skenování

Bezdotykové skenování umožňuje digitalizaci objektu bez fyzického kontaktu snímacího zařízení skeneru a skenovaného objektu. Obecně je bezkontaktní snímání rychlejší než dotykové. Při tomto způsobu digitalizace nedochází k poškození či deformaci skenovaného objektu.

4.1.1 Optické skenování

U technologie optického skenování je využito snímání objektu nejčastěji v několika krocích. K zachycení celého povrchu jsou skeny prováděny z různých pozic skeneru vůči objektu. Z jednotlivých skenů je poté získán mrak bodů, který se převede na polygonální síť (mesh). Tu je pak dále možno transformovat na CAD model.

Proces skenování tedy spočívá v pořízení souboru „2D fotografií“ povrchu skenovaného objektu. Snímací zařízení, nejčastěji videokamery, jsou vybaveny CCD

čipy. Díky nim lze zaznamenat informace o textuře povrchu objektu a dopočítat vzdálenost objektu od senzoru. Aby došlo k správnému určení polohy jednotlivých fotografií (skenů) a k jejich vzájemnému propojení, musí se umístit na povrch objektu či do jeho okolí skupina bodů. Většina optických zařízení navíc nedokáže kvalitně skenovat lesklé povrchy. Proto se na povrch objektu nanáší určitá látka (např. křídový nástrík), která dokáže změnit jeho barvu a snížit reflexivitu povrchu. [1]

Optický bezkontaktní způsob skenování v sobě skýtá mnoho výhod pro praktické využití. Hlavní výhodou optických skenerů je možnost zachytit rozsáhlý soubor bodů. Dochází tedy k snížení času potřebného k digitalizaci v porovnání s dotykovými skenery. Jelikož není zařízení při snímání v kontaktu s měřeným objektem, je možné měřit např. horké či měkké předměty. Nevýhodou je nutná úprava povrchu před skenováním a omezená schopnost snímání dutin a otvorů. [1, 9, 10]

A. ATOS II

Německá firma GOM je výrobcem optického bezdotykového skeneru, který je zejména díky své mobilní konstrukci hojně využíván v mnoha různorodých aplikacích. Vhodné je jeho použití v případech, v nichž je skenovaný objekt porovnáván s digitálním modelem. To znamená v oblastech CAD, CAM či FEM. [11]

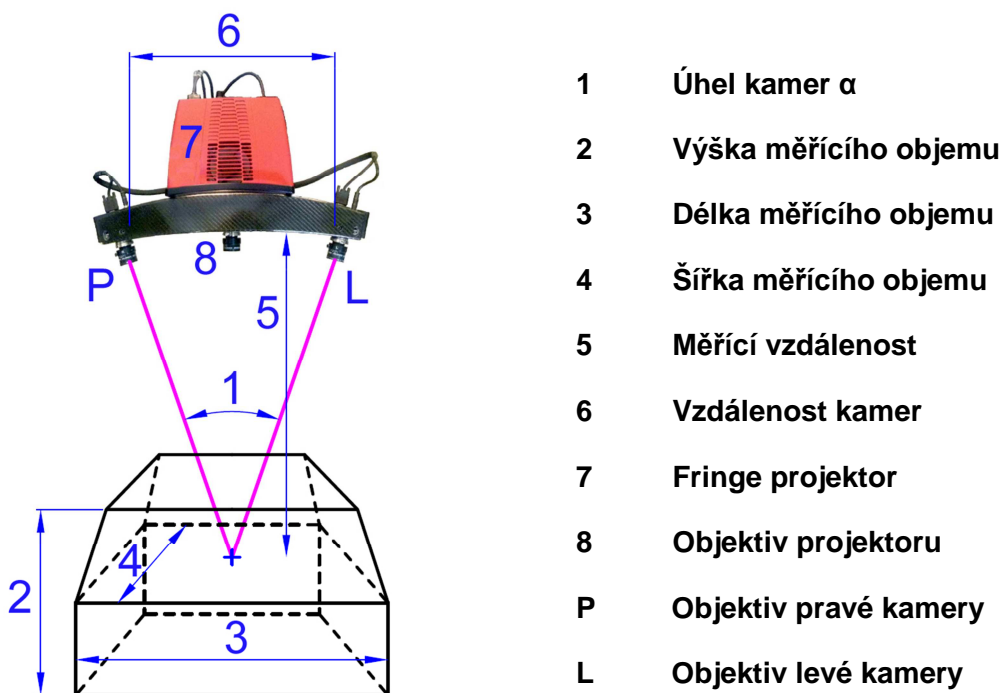
Součástí skenerů ATOS jsou na první pohled viditelná dvojice kamer a laserů a jeden projektor. Lasery slouží k ustavení skeneru do optimální vzdálenosti od měřeného objektu tak, aby se objekt nacházel uvnitř měřicího objemu. Projektor a kamery jsou nutné k samotné činnosti skeneru, který využívá principů fotogrammetrie a triangulace (stereoefekt, Fringe projection), jež byly popsány v kapitole 3.3.1. Měření probíhá velmi rychle s velkou hustotou dat, která dosahuje až 1 400 000 bodů na pouhý jeden záběr. Přesnost snímání skeneru ATOS je závislá na použitém objektivu a jeho měřicím objemu. Její velikost se pro standartní objektivy pohybuje v řádu setin milimetru. [8, 11]

Před samotným skenováním je nutné povrch objektu důkladně očistit a odmastit, aby nedošlo ke zkreslení skenu povrchovými nečistotami. V dalším kroku jsou na předmět nalepeny referenční body, jejichž velikost a vzájemná vzdálenost odpovídá použitému měřicímu objemu. V případě, že má objekt nevhodný povrch k optickému skenování (je lesklý, průhledný, černý atd.), je nutné ho upravit antireflexním

nástřikem. Vytvořený film na skenované součásti změní optické vlastnosti povrchu. Využívá se například křídového spreje nebo titanové běloby, které zesvětlí a zmatní povrch. S povrchem se logicky zakryjí i nalepené značky. Ty se musí důkladně očistit, aby je mohl systém skeneru rozpoznat a určit tak polohu skenu v prostoru, resp. polohu skeneru v jeho souřadném systému. Referenční body je vhodné umístit i do okolí předmětu. Tři známé značky z předchozího snímku jsou minimálním počtem, který musí obě kamery vidět pro určení správné polohy. Dále je nutné zvolit vhodný měřicí objem, který definuje prostor o určitém rozměru, ve kterém dokáže skener měřit. Měřicí objem je dán použitím objektivu a zároveň určuje vzdálenost skeneru, resp. měřicí hlavy, od měřeného objektu. Firma GOM nabízí širokou řadu měřících objemů (objektivů) za účelem co možná největší univerzality zařízení. Na katedře výrobních systémů jsou k dispozici celkem tři měřicí objemy o těchto rozměrech (délka x šířka x výška):

- 55x44x30 (dále označován jako 55 či SO)
- 250x200x200 (dále označován jako 250)
- 700x560x560 (dále označován jako 700)

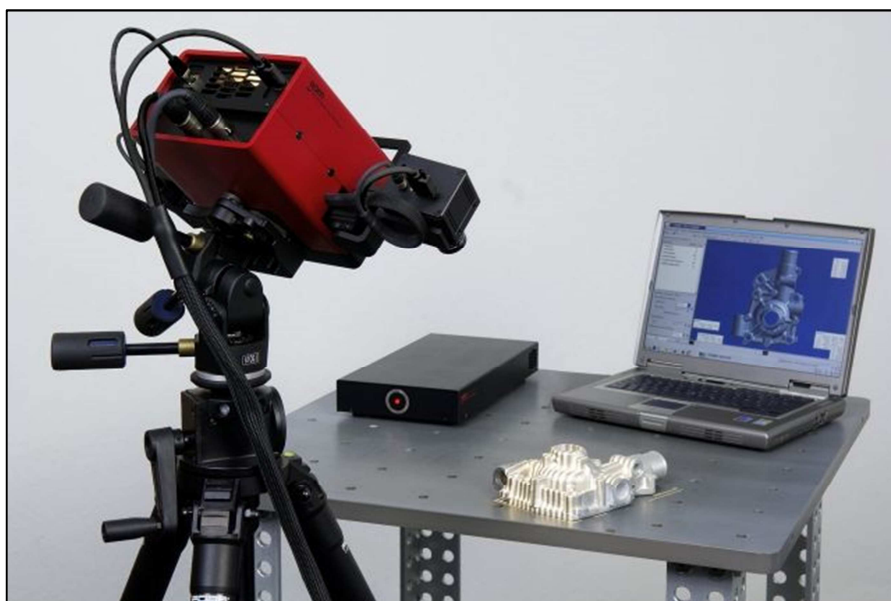
V případě výměny objektivů kamer je nutné kamery zkalibrovat pomocí kalibračního objektu, který je dodáván výrobcem při koupi zařízení.



Obr. 7: Důležité parametry skeneru ATOS II [8]

Objekt, který je určen ke skenování, se umísťuje na podložku tmavé barvy, otočný stůl, či do přípravku, které mohou být oblepeny referenčními značkami. Předmět je tedy možno, při vhodných světelných podmínkách, snímat téměř v jakémkoliv prostředí. Volba upnutí předmětu je rozdílná pro každé měření a ne vždy je nutné nasnímat celý objekt. V případě, že uživatel chce získat kompletní digitální model, nesmí být výhled kamer nijak výrazně blokován tak, aby bylo znemožněno naměření určité části předmětu. Právě pro tyto případy je vhodné využít speciálního mobilního stativu, který dovoluje se skenerem pohybovat a naklápět se snímací hlavou ve třech osách. Skenování pak tedy probíhá sejmutím objektu z různých poloh a úhlů k dosažení přesně takové úrovně digitalizace, jakou uživatel požaduje.

Mezi hlavní přednosti systému ATOS patří flexibilita měření, jež umožňuje měřit objekty od milimetrových rozměrů až po objekty, jejichž délka dosahuje až několika metrů. [11]



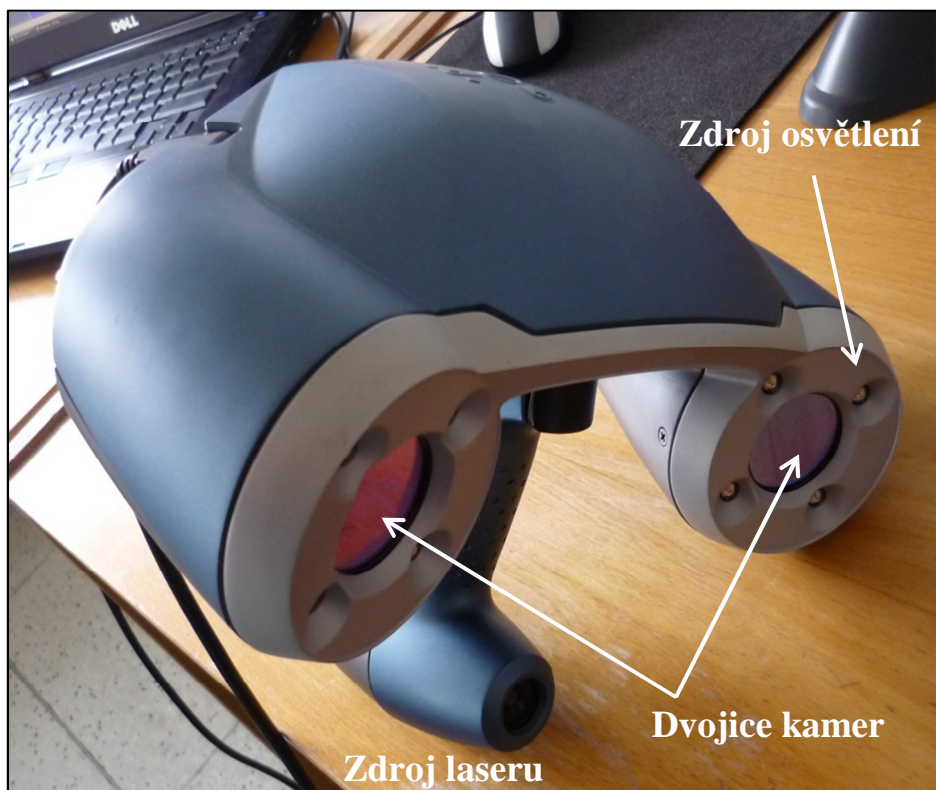
Obr. 8: Optický skener ATOS II [11]

B. RevScan

Skener RevScan, z produktové řady HANDYScan, je vybaven zdrojem laserového paprsku a osvětlení a dvojicí CCD kamer s vyhodnocováním za použití triangulace. Při skenování je povrch osvětlován červeným světlem z diod, rozmístěných kolem obou kamer, a laserovým křížem. Kamery jsou vybaveny filtry, jež mají za následek, že je znamenávána pouze vlnová délka červeného světla. Skenování je

zprostředkováno ručním naváděním skeneru do snímacích pozic. V osvětleném prostoru před skenerem je snímán kříž laserových paprsků, přesněji tedy jeho deformace na povrchu objektu. Na připojeném počítači vzniká obraz snímání, jenž je vytvářen automaticky a neustále se aktualizuje a zpřesňuje. To umožní uživateli sledovat v reálném čase průběh skenování, tím se rozumí úroveň úplnosti naskenování snímaného objektu. Dále zde může vidět i pozici laserového kříže. Uživatel tak lehce zjistí, v jaké poloze se nachází a jaká místa jsou již v této pozici naskenovaná. Stejně jako u ostatních optických skenerů je nutné objekt nebo jeho okolí vybavit referenčními značkami pro získání informace o poloze skeneru. Povrch značek je reflexní a odráží dopadající světlo z diod. Skener je na základě odrazu světla dokáže zaregistrovat. Aby byl umožněn pohyb zařízení vůči skenovanému tělesu, je potřeba znát aspoň čtyři referenční značky z předchozí polohy skenování. To je minimální počet značek nutný k určení polohy snímaných dat v souřadném systému.

Velikou výhodou tohoto zařízení je velice jednoduchá obsluha, kterou zvládne i laik bez předchozích zkušeností se skenováním. Dále pak ten fakt, že se zařízením RevScan můžeme pracovat téměř v jakémkoliv prostředí, ať už v interiéru či exteriéru. Jeho přesnost, uváděná výrobcem, dosahuje až 0,05 mm. [12, 13]



Obr. 9: Skener RevScan

4.1.2 Laserové skenování

Nedílnou součástí zařízení pro laserové skenování je zdroj produkující soustředěný paprsek světla – laser. Tím je nutné osvětlit každý bod objektu, který je potřeba naskenovat. Skenování pracuje na principu odraženého paprsku. To znamená, že skener vyšle laserový paprsek kolmo na povrch součásti, kde dojde k jeho odražení a návratu paprsku do skeneru. Paprsek se odráží od povrchu zpátky do zařízení pod určitým úhlem. Z jeho velikosti systém skeneru vyhodnotí informace o zakřivení povrchu. Dále pak rozdíl doby od vyslání paprsku do jeho navrácení nese informaci o rozměru objektu ve směru vyslání paprsku (o vzdálenosti snímaného bodu). Systému pak tyto informace slouží k identifikování bodu v prostoru. Laserový paprsek tímto způsobem osvětlí celé těleso. Významným výrobcem laserových skenerů je firma Konica Minolta, která na trh přinesla několik typů skenerů řady Vivid.

V případech, kdy jsou skenery doplněny o kamery s CCD snímači, mohou zaznamenat barvu a texturu povrchu snímaného tělesa. To znamená, že na výsledný model může být promítnuta textura povrchu originálu.

Výhodou použití laserových skenerů je poměrně snadná obsluha a vysoká přesnost skenování. Dále pak je možno naskenovat zahlobení složitých tvarů či neprůchozí díry, což může být např. u optických skenerů problém. [1]

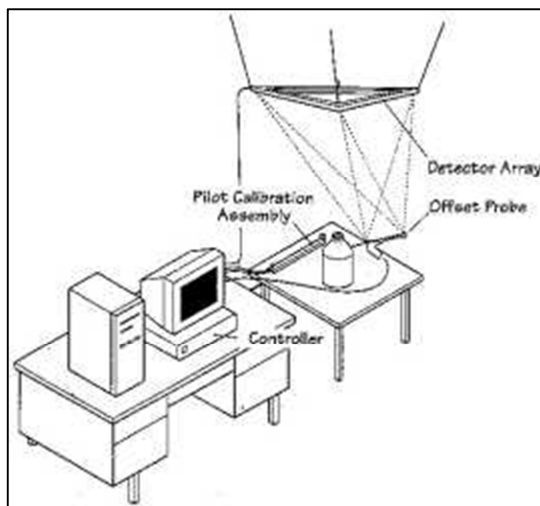


Obr. 10: Laserový skener Vivid VI-9i [14]

4.1.3 Ultrazvukové skenování

Při skenování ultrazvukem je využíváno snímání povrchu ultrazvukovou sondou. Snímací sonda je přiložena k povrchu objektu a v okamžiku, kdy chce uživatel začít snímat, stiskne spoušť a skener vyšle signál. Jedná se o zvukový signál, jehož frekvence odpovídá ultrazvuku. Ten je zachycen skrze ultrazvuková čidla nacházející se na speciální konstrukci v okolí objektu. Pomocí těchto čidel je signál dekodován do prostorových souřadnic.

Podstatnou výhodou zařízení je jeho relativně nízká cena. Jedná se o nejlevnější alternativu v oblasti 3D skenování. To je ovšem vykoupeno nízkou přesností, která odpovídá hodnotě 0,3 až 0,5 mm. [1]



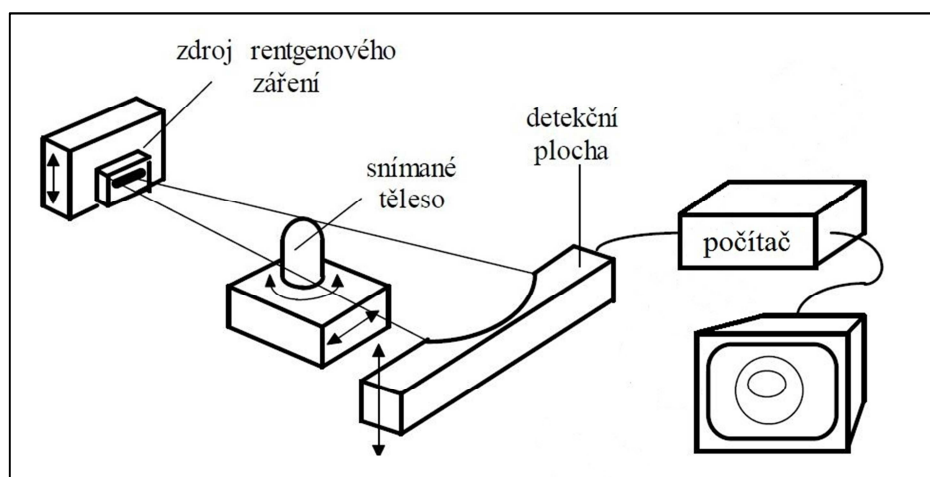
Obr. 11: Ultrazvukový skener [1]

4.1.4 CT (rentgenové) skenování

Pro skenování prostorových těles lze využít i zařízení, která ke své funkci používají rentgenové záření. Tato zařízení spadají do tzv. počítačové tomografie (CT), která je známá nejčastěji ve spojitosti s lékařskými vyšetřeními orgánů člověka. V medicínské oblasti jsou snímány orgány zobrazeny plošně v řezech, které by složením za sebe tvořili obraz daného orgánu. A právě na tomto principu fungují CT skenery.

Těleso, u kterého je potřeba vytvořit jeho digitální obraz, je umístěno mezi zdroj rentgenového záření a detekční vrstvu. Snímané těleso se během ozařování otáčí v intervalu 0 až 180° kolem vertikální osy. Obraz řezu tělesem vzniká po zpracování všech dat z jedné otáčky, které jsou postupně získávány na detekční ploše po každém

natočení objektu. Pro získání dalšího řezu se zdroj rentgenového záření spolu s detekční plochou posouvají svisle ve směru osy a proces se opakuje. Po naskenování všech řezů je v počítači vytvořen digitalizovaný model snímaného tělesa. Za výhodu lze považovat možnost snímání vnitřní geometrie objektů bez jejich poškození. Nevýhodou je jistě vysoká cena zařízení a možnost skenování objektů jen z určitého materiálu, kterými projde rentgenové záření. [15]



Obr. 12 Princip rentgenového skenování [15]

4.2 Nedestruktivní dotykové skenování

Dotykové nedestruktivní skenery musí být při procesu skenování ve styku s měřeným objektem. Vzájemný dotyk je zprostředkován pomocí dotykového tělíska různého tvaru. Při skenování objektů nedochází k jeho poškození.

4.2.1 Skenování mechanickými rameny

Snímání tedy pracuje na principu kontaktu výstupního členu zařízení se skenovaným objektem. Výstupním členem je nejčastěji hrot, který je připojen na několik vzájemně spojených profilů tvořící rameno. Jednotlivé profily pojí mezi sebou kloubová vazba. Konstrukce skeneru tak připomíná lidskou paži s nataženým prstem. Pro každou polohu hrotu odpovídá určité natočení všech kloubů konstrukce. Tato informace je zaznamenávána čidly uvnitř kloubů a je tak vyhodnocena poloha

skenovaného bodu v prostoru definovaná kartézskými souřadnicemi: x , y , z . Popisovaný způsob skenování je využíván zejména v oblastech návrhu designu nových výrobků, filmovém a herním průmyslu. V těchto odvětvích se nejčastěji jedná o přenesení návrhu z plastelíny do digitální podoby k dalšímu zpracování. Jedním z nejznámějších představitelů mechanických ramenových 3D skenerů je zařízení MicroScribe.

Hlavní předností těchto zařízení je nepochybně nižší cena a jejich velikost. Právě kompaktní rozměry a hmotnost do několika kilogramů dovolují jeho použití na větším stole, takřka kdekoliv. Slabina skenerů tkví v tom, že skenování objektu je velmi zdoluhavé. Skenovaný objekt se totiž musí hrotem objet celý. Přesnost skeneru je v desetinách až setinách milimetru. [1]



Obr. 13: Skener Microscribe [16]

Dále existují přesnější a konstrukčně složitější ramena, jež představují mobilní verze souřadnicových měřicích strojů. Tato ramena se využívají např. v případech, kdy není možno přemístit měřený objekt, anebo je příliš velký. Nelze tak použít klasický souřadnicový měřicí stroj. Přesnost těchto ramen dosahuje řádu mikrometrů.

4.2.2 Skenování na souřadnicových měřicích strojích

Jako další alternativu dotykových skenerů je možno vnímat i souřadnicové měřicí stroje (SMS), jejichž primární využití spočívá v kontrole tvaru, rozměru či polohy. Avšak jsou využitelné i v oblasti digitalizace. Měření jednotlivých bodů na objektu je interpretováno souřadnicemi, které jsou vztaženy k nulovému bodu ve všech třech

osách souřadného systému. Informace o rozměrech měřených objektů jsou získávány prostřednictvím spínacích a skenovacích dotekových sond.

Spínací sondy v okamžiku styku doteku s povrchem vysílají systému signál. Ten nese informaci o souřadnicích měřeného bodu. Spínací sondy musí po provedeném doteku odjet od povrchu a opět se k němu vracet. Digitalizace je pak velmi zdoluhavá. Na jejím čase je závislý počet sejmutých bodů. Proto se dnes často využívá skenovacích sond. Při měření je dotek sondy neustále v kontaktu s měřeným povrchem i při jejím posunu. To poskytuje nepřerušovaný výstup výchylek, který přináší obrovské množství zaznamenaných bodů ($2000 \div 6000$ bodů za minutu). Je tak umožněno komplexní snímání složitějšího tvaru povrchu součásti. Tuto technologii využívají například systémy Renscan. [17, 18]

V dnešní době se v praxi využívají CNC SMS, kde je měřicí sonda naváděna dle programu. Dále je možné měřicí sondu využít přímo na obráběcím NC stroji jako přídatné zařízení. Měření je poté limitováno a je určeno pro menší objemy dat. [1]

Pro měření na CNC SMS tedy odpadá nutnost ručního navádění snímací sondy po povrchu objektu, což snižuje časovou náročnost skenování. Naměřená data mohou být použita k digitalizaci nebo mohou sloužit k vytvoření CNC programu k reprodukci měřeného objektu. SMS dosahuje vysoké přesnosti v řádu tisícín milimetru. V dnešní době je umožněno také snímání pomocí bezdotkových sond.

U všech dotekových skenerů, které mají měřicí dotek ve tvaru koule, je nutné přepočítat polohou naskenovaných bodů. Body reprezentující povrch tělesa jsou oproti skutečnému povrchu ekvidistantně posunuty o poloměr měřicího doteku. [15]



Obr. 14: Pětiosé skenování systému Renscan5 [17]

4.3 Destruktivní skenery

Jak již název napovídá, při skenování objektu dojde k jeho nenávratné destrukci. Z toho plyne, že destruktivní skener je možno použít pouze v případě, že skenovaný objekt již uživatel nepotřebuje. Použití skeneru je výhodné tehdy, kdy je třeba získat obraz vnitřní geometrie součástí. Dále pak u objektu s velice členitým tvarem také vnější geometrie, který nelze dostatečně naskenovat jinou metodou snímání.

Činnost zařízení probíhá v postupném odfrézování a následném skenování jednotlivých vrstev pomocí optického skeneru. Avšak než k tomu bude moci dojít, je nutné objekt připravit. Těleso se umístí do rámu, ve kterém dochází k jeho zalití speciálním materiálem. Barva materiálu by měla být kontrastní k barvě povrchu objektu, aby byla při digitalizaci zajištěna jednoznačná interpretace. V případě skenování složité vnitřní geometrie je k jejímu vyplnění doporučeno užití vakua, aby bylo dosaženo úplného vyplnění všech dutin. Následně je již možné vzniklý celek upnout na stůl frézky, kde dochází k jeho postupnému odfrézování a skenování. Po získání snímků vrstev se provede další zpracování dat. V místě průsečnice výplňového materiálu a objektu jsou vytvářeny body. To je provedeno v každé vrstvě, přičemž zbytek obrazu je odstraněn. Tímto způsobem vzniká napříč všemi řezy shluk bodů o souřadnicích x a y , který tak interpretuje prostorový model tělesa. Příkladem zařízení popisované metody je skenovací systém CSS – 3000 od americké firmy CGI. [1]

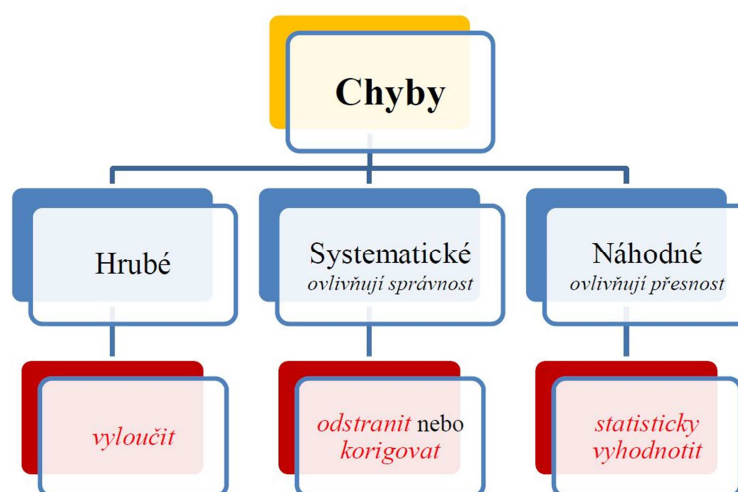


Obr. 15: CSS – 3000 SYSTEM [19]

5 CHYBY A NEJISTOTY MĚŘENÍ

5.1 Chyby měření

Chyba se vyskytuje u každého měření, přičemž její velikost je dána odchylkou, kterou má naměřená hodnota od skutečné hodnoty měřené veličiny. Přesnost měření ovlivňuje chyba označovaná jako náhodná.



Obr. 16: Rozdělení chyb podle původu [20]

5.1.1 Chyby hrubé

Mezi hrubé chyby řadíme ty, které vznikly omylem či pochybením osoby provádějící měření. Všechna měření vyznačující se touto chybou je nutné zaregistrovat a odstranit z naměřených výsledků. Naměřená hodnota s hrubou chybou je výrazně odlišná od ostatních hodnot měření. [21, 22]

5.1.2 Chyby systematické

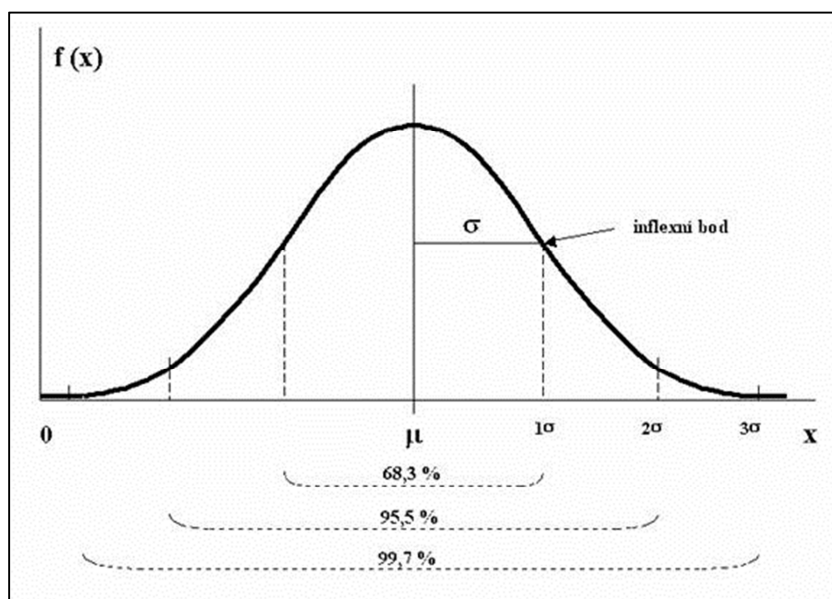
Výskyt systematických chyb je pravidelný. Jejich velikost je stálá, nebo se předvídatelně mění. Nejčastěji jsou způsobeny vlastnostmi použitých přístrojů, vlivem podmínek okolí, či samotnou povahou měřicí metody. Systematické chyby je

nutné odstranit, nebo je potlačit příslušnou korekcí. K jejímu určení většinou postačí vztah pro výpočet absolutní chyby, kde x_m je naměřená a x_s je skutečná hodnota měřené veličiny [21, 22]

$$\Delta x = x_m - x_s \quad (2)$$

5.1.3 Chyby náhodné

Jejich vznik je zapříčiněn nepředvídatelným působením náhodných vlivů. Hodnoty zatížené náhodnou chybou není možno vyloučit z dosažených výsledků. Při opakovaném měření se jejich velikost i znaménko mění. Při určování jejich velikostí se tedy vychází z opakovaných měření za použití statistického pravděpodobnostního modelu. Tento model je reprezentován zákonem rozdělení příslušné náhodné chyby, nejčastěji Gaussovým normálním rozdělením. Výsledek měření je pak vyjádřen jako aritmetický průměr určený ze souboru opakovaných měření. Náhodná chyba je pak určena skrze směrodatnou odchylku aritmetického průměru. [21, 22]



Obr. 17: Gaussovo normální rozdělení [23]

Aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

Směrodatná odchylka aritmetického průměru

$$s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

5.2 Nejistoty měření

Nejistota měření definuje interval hodnot obklopujících naměřenou veličinu. Mezi jeho krajními hodnotami se nachází skutečná velikost měřené veličiny. Nejistota však nezávisí pouze na získané veličině, ale také na měřicím zařízení či použitých korekcí a konstantách. Existuje hned několik základních nejistot měření.

- **Standartní nejistota typu A (u_A)**

Tuto nejistotu způsobují náhodné chyby, přičemž s vzrůstajícím počtem opakovaných měření dané veličiny dochází ke snižování velikosti nejistoty. Opakovaná měření musí probíhat za stejných podmínek a předpokladem je normální rozdělení náhodné chyby. Interval nejistoty typu A je vyjádřen pomocí směrodatné odchylky aritmetického průměru (4). Pro malý počet měření je směrodatná odchylka násobena korekčním koeficientem. [24]

$$u_{Ak} = k \cdot s(\bar{x}) \quad (5)$$

Tab. 1: Velikost korekčního koeficientu pro opakovaná měření [24]

n	9	8	7	6	5	4	3	2
k	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7,0

- **Standartní nejistota typu B (u_B)**

Nejistota typu B není závislá na počtu měření. Je dána součtem dílčích nejistot plynoucích z různých zdrojů (teplotní podmínky, měřicí přístroj, atd.). Její určení je obvykle velice složité a vyžaduje rozsáhlé zkušenosti. [24]

$$u_{B_{zi}} = \frac{z_{imax}}{k_1} \quad u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{B_{zi}}^2} \quad (6)$$

z_{imax} největší odchylka i-tého zdroje

k_1 součinitel rozložení pravděpodobnosti (pro normální bývá $k_1 = 2$)

- **Kombinovaná nejistota (u_c)**

Vznikne sumací obou standartních nejistot (5, 6).

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (7)$$

- **Rozšířená nejistota U**

Rozšířenou nejistotu je vhodné využít v případě, kdy je potřeba ještě zvýšit pravděpodobnost správnosti výsledku měření. Toho se docílí vynásobením kombinované nejistoty (7) příslušným koeficientem. [24]

$$U = k_2 \cdot u_c \quad (8)$$

k_2 pro pravděpodobnost 95% se použije velikost koeficientu $k_2 = 2$

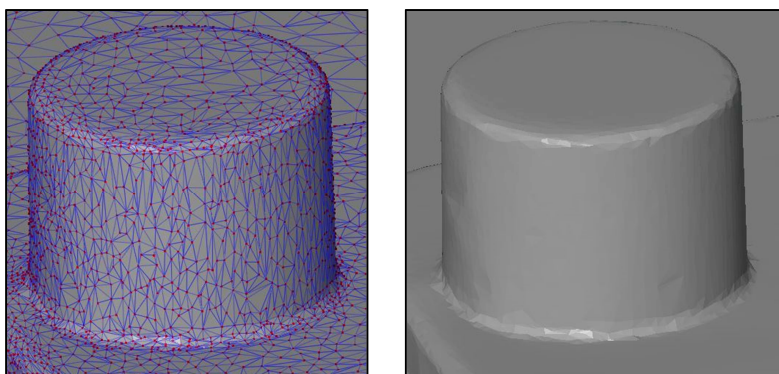
6 GOM INSPECT

Specializovaný software firmy GOM, která je výrobcem i použitého skeneru ATOS II, umožňuje polygonizaci mraku bodů na síť a její následnou úpravu. Dále poskytuje možnost na naskenovaných datech provádět inspekční operace. Vstupní data mohou být z různých druhů skenerů, jako jsou např. optické, laserové a CT skenery.

Prostředí softwaru GOM Inspect obsahuje tři pracovní oddíly: Inspekce (Inspection), Tvorba protokolů měření (Report) a Úprava polygonální sítě (Mesh editing). Pro potřeby diplomové práce je důležitý zejména oddíl Inspekce, jenž je v praxi využíván především pro porovnání CAD modelu s naměřenými daty. [25]

6.1 Měření rozměrů v prostředí inspekčního softwaru

Nejprve je nutné připomenout, že při inspekci se pracuje s polygonizovaným mrakem bodů, naskenovaná data jsou tedy ve formátu STL. To znamená, že naskenovaný objekt je tvořen sítí jednotlivých bodů, která je vyplněna miniaturními ploškami. Při práci s modelem v softwaru GOM Inspect je síť defaultně skryta a povrch je reprezentován soustavou zmíněných ploch.

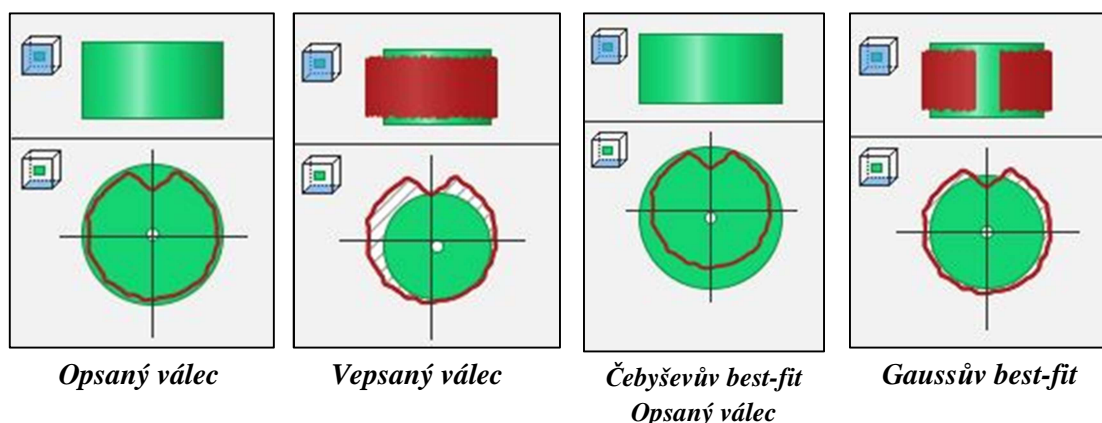


Obr. 18: Reprezentace povrchu naskenovaného objektu

Přímo na samotných datech však měřit nelze, jelikož jsou vnímána „jen“ jako síť bodů. Proto je nutné v softwaru definovat, jaké části sítě tvoří ve skutečnosti různé geometrické prvky, z nichž je povrch objektu složený. To se provede proložením bodů, jež mají tvořit onen prvek jeho ideálním obrazem. V GOM Inspect je nazývaný fitting elementem a může mít podobu bodu, přímky, roviny, válce, koule a dalších.

Pomocí takto proložených elementů lze vytvořit kóty pro měření různých rozměrů. Například po proložení dvou rovin lze zkonstruovat kótu pro určení vzdálenosti či úhlu mezi nimi. Vpřípadě, kdy se měří např. průměr válce, je měřen přímo na samotném fitting elementu.

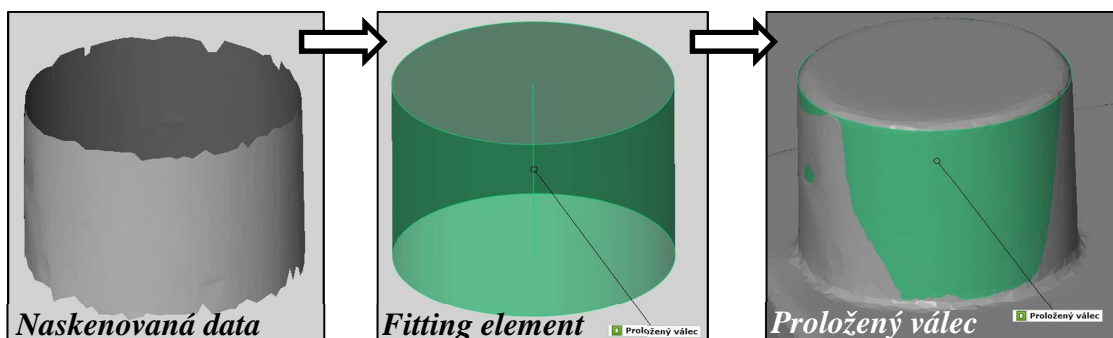
Pro výpočet rozměru fitting elementu software využívá několika výpočetních metod. Např. pro výpočet ideálního válce existují čtyři možnosti. V prvních dvou případech je vytvořen válec o průměru, jenž je definován následujícím. Jeho velikost je dána největším rozměrem, jenž je možný vepsat vybraným bodům. Průměr válce ale může být určen i nejmenší velikostí, při které válec opisuje vybrané body. Další metodou je Čebyševův best-fit, jenž pracuje také s vepsanými a opsanými elementy. Touto metodou je vypočítáván najednou opsaný a vepsaný válec tak, aby jejich středy byly totožné. Tímto způsobem je tedy vytvořen vnitřní a vnější válec se společnou osou. Jejich odečetní určuje pozici středního válce. Ve výběru nabíčky při jeho tvorbě je poté možné zvolit jeden z těchto tří válců. [26]



Obr. 19: Výpočetní metody fitting elementů válce

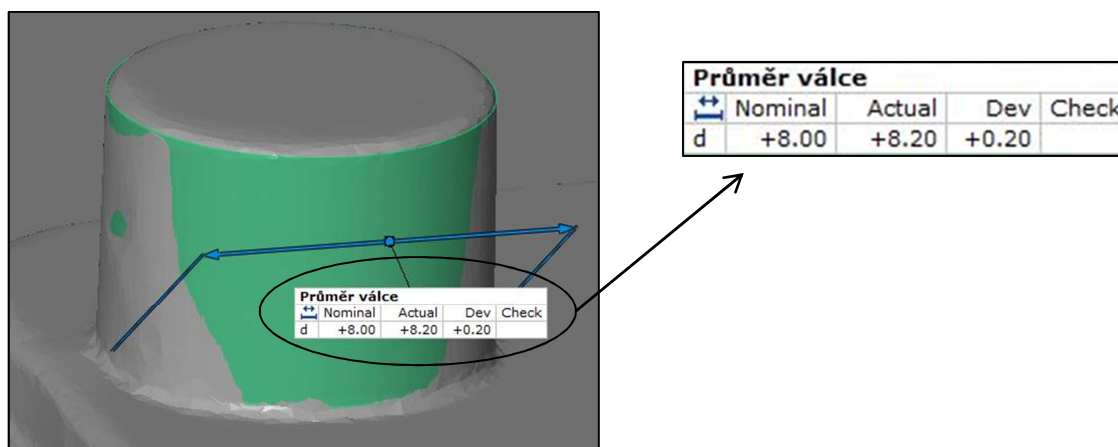
Poslední a nejpoužívanější metodou (použitou i při analýze v této práci), je tzv. Gaussův best-fit. Při jeho volbě je určován rozměr dle Gaussova normálního rozdělení. Proložený válec se vypočítá tak, aby součet kvadratických odchylek byl co nejmenší. Je zde možno nastavit, kolik bodů z původního výběru se má použít k jeho výpočtu. Každá volba tak vyloučí určité procento bodů z volené množiny. Možností je celkem šest. Jsou odstupňované v rozmezí $1 \div 5 \sigma$, či je možno zvolit všechny body. V této práci bylo použito hodnoty 3σ (přibližně 99,7% všech bodů) na základě zkušeností, přičemž i v podkladech výrobce je pracováno s touto střední možností. Gaussův best-fit tedy oproti Čebyševovu nemusí brát v potaz nejvzdálenější body výběru. [26]

Po vytvoření válce je v prostředí softwaru zobrazen zelenou barvou spolu s praporkem, na němž je možné zobrazit jeho průměr či informace o počtu tvořících bodů, maximální odchylce a další.



Obr. 20: Proces tvorby fitting elementu

V okamžiku vytvoření prvku je již umožněno porovnání skenovaných (aktuálních) dat s těmi „skutečnými“ (nominálními daty). Po zadání nominálního rozměru se v modelu objeví prostorová kóta nesoucí informace o nominálním a aktuálním rozměru, jež jsou doplněné o jejich odchylku.



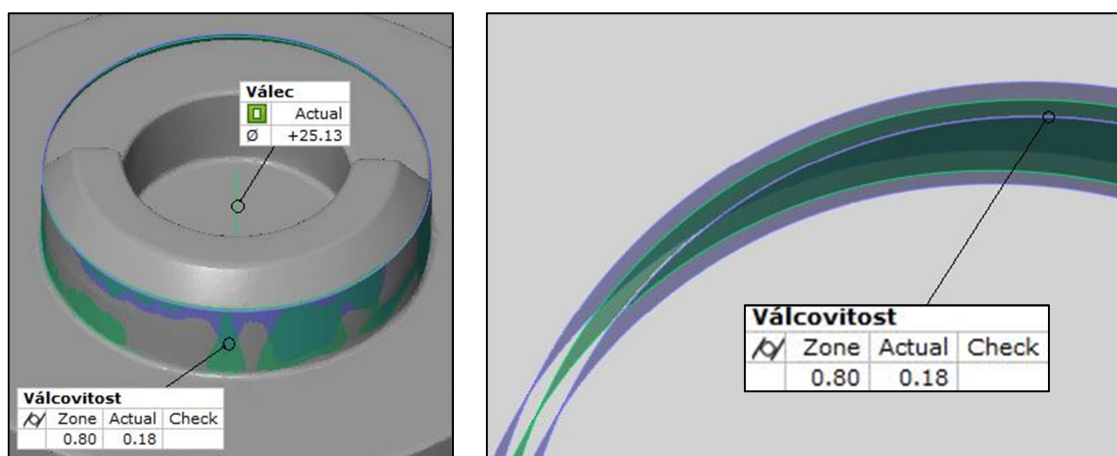
Obr. 21: Vytvoření kóty s porovnáním aktuálního a nominálního rozměru

Hodnoty rozměrů lze mimo proložených fitting elementů také získat skrze konstrukční prvek Caliper. To v překladu znamená posuvné měřítko. A právě na jeho principu měření funguje. Často je používán při určování vzdálenosti rovnoběžných povrchů. Při volbě této funkce se nejprve provede výběr bodu doteku na obou rovinných plochách. Po jejich volbě se v každém bodu objeví kotouček. Polohu kotoučů je možné měnit tak, aby se dotýkaly vně povrchů, mezi kterými je měřena vzdálenost. Mohlo by se totiž stát, že by se dotekový bod umístil například do prohlubně v síti, což by pak vedlo k mylným rozměrovým informacím. Dále je možné nastavit poloměr

kotoučů tak, aby se měřila vzdálenost povrchů ve větší oblasti. Zvětší se tak rozměr doteku, podobně jako je tomu při měření posuvným měřítkem či mikrometrem, kdy mají čelisti určitou velikost a neměření pouze v bodech. Po ukončení tvorby prvku je možné vytvoření kóty pro určení vzdálenosti. Po zadání hodnoty nominálního rozměru je získáno porovnání mezi nominálními a aktuálními daty.

6.2 Určení geometrických tolerancí v prostředí inspekčního softwaru

Při analyzování přesnosti tvaru či směru naskenovaných prvků je možno využít funkcí pro určování geometrických tolerancí. K jejich dosažení je nutné provést konstrukci některých ideálních prvků, na jejichž základě se vytvoří daná tolerance. V podstatě se postupuje stejným způsobem, jako když se vytvářejí kóty při určování rozměrů. Vznikají tedy příslušné fitting elementy reprezentující zkoumaný prvek nebo základnu, popř. soustavu základen. Dále je uveden příklad tvorby tolerance pro zjištění odchylky tvaru. Příklad je opět prezentován na objektu naskenovaného válce. V případě, že se požaduje zjištění odchylky válcovitosti, vytvoří se fitting element způsobem popsáným v předchozí kapitole. Poté je možno přes nabídku inspekce vybrat položku měření válcovitosti. Objeví se praporek, jenž uvádí tvarovou odchylku spolu s velikostí tolerančního pole (na obrázku je zobrazeno fialovou barvou). Ovšem pro potřeby diplomové práce se toleranční pole neregistrovala a zjišťovaly se pouze hodnoty odchylek tvaru a směru.



Obr. 22 Inspekce přesnosti tvaru

7 ANALÝZA PŘESNOSTI OPTICKÉ 3D DIGITALIZACE

Následující část práce je věnována analýze přesnosti digitalizace, která byla uskutečněna použitím bezkontaktních optických skenerů. Samotná analýza byla provedena podle následující strategie, jež se skládala z několika dílčích kroků.

Nejprve se provedl návrh modelu (v dalším textu nazýván měřicím etalonem), jehož součástí jsou různé tvarové objekty. Na etalonu byly vybrány určité rozměry, na kterých se analyzovala přesnost snímání. Nicméně než toto bylo možné provést, musely se zjistit skutečné hodnoty sledovaných rozměrů na fyzickém dílu etalonu po vyrobení. Reálné velikosti volených rozměrů se získaly měřením na souřadnicovém měřicím stroji.

Analýza se započala několikanásobným naskenováním etalonu dvojicí optických bezkontaktních skenerů ATOS II (pro tři různé objektivy) a RevScan. Použitými zařízeními není možné kvalitně naskenovat většinu objektů bez zmatňujícího nástřiku. Výška vrstvy nástřiku ovšem nemusí být rovnoměrná po celém povrchu. Za účelem korekce měření by se tak její velikost stěží určit. V praxi jsou pak výstupy z inspekčních operací na skenovaných datech prezentovány bez korekce měření o výšku této vrstvy. Jelikož bylo úkolem analyzovat přesnost snímání za podmínek běžné praxe, proběhlo skenování etalonu z konvenčně používaného materiálu vyžadujícího nástřik. Výsledky analýzy ovlivněné vrstvou nástřiku tak budou pro praxi jistě přínosnější, poněvadž budou aplikovatelné na její výstupy. Pro přibližnou představu o její možné výšce proběhlo praktické testování na zkušebním tělese, kdy se skenovalo nejprve bez nástřiku a poté s ním. Povrch tělesa byl nereflexní a využitelný tak i pro skenování bez jeho úpravy. Bylo zjištěno, že se při rovnoměrném nánosu může tloušťka vrstvy pohybovat do 0,01 mm.

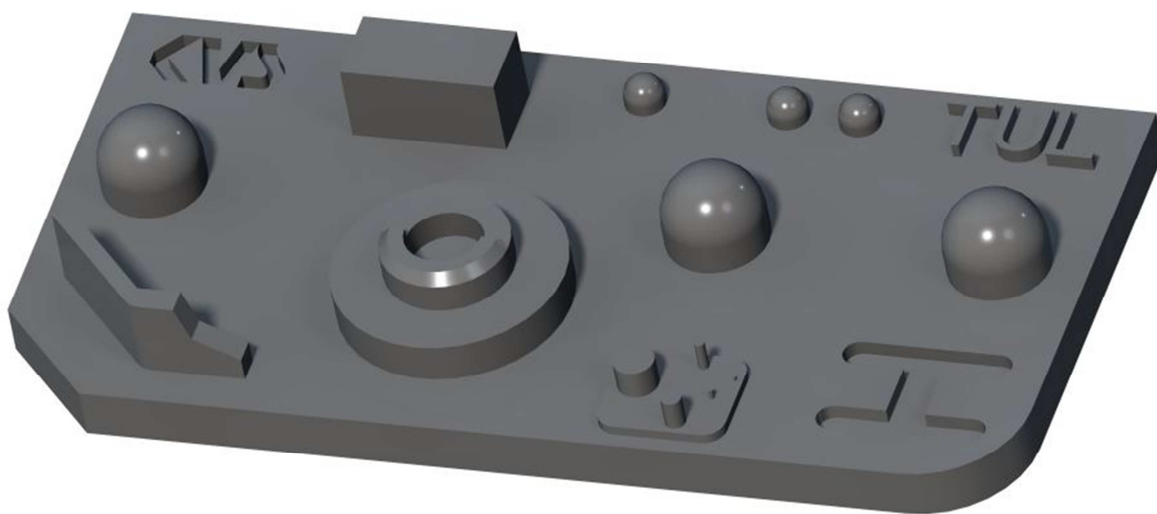
V dalším kroku proběhlo zpracování naskenovaných dat v softwaru GOM Inspect, čímž byly získány informace o velikosti rozměrů digitalizovaného etalonu. Porovnáním hodnot rozměrů získaných ze softwaru s naměřenými hodnotami ze souřadnicového měřicího stroje byla určena jejich odchylka. U vybraných prvků se také analyzovala přesnost digitalizace jejich tvaru či směru. Dále se sledovaly limity skenování použitých digitizérů prostřednictvím snímání detailů na povrchu etalonu. Na závěr došlo k vyhodnocení výsledků posuzovaných hledisek.

7.1 Návrh měřicího etalonu

K uskutečnění analýzy bylo nezbytné použít předmět definovaného tvaru a rozměru. Proto se rozhodlo, že se navrhne měřicí etalon využitelný přímo pro analýzu přesnosti řešené v této práci, ale i pro potencionální budoucí využití katedry. Návrh v podobě CAD modelu byl vytvořen v softwaru CREO Elements.

Při navrhování tvaru etalonu se vycházelo z často vyskytujících se základních tvarů na strojních součástech. Těmi jsou například válce, válcové otvory, drážky a žebra. Avšak mnohdy mají existující objekty tvar nepopsatelný pomocí rozměrových údajů. Tímto jsou myšleny kupříkladu karosérie automobilů. Proto se etalon doplnil také o obecnou prostorovou plochu nedefinovaného tvaru a rozměru. Jednotlivé prvky, u nichž se sledoval jejich rozměr či tvar, jsou popásány dále v textu. Etalon byl původně navrhován pro snímání objektivem 250 skeneru ATOS II a skenerem RevScan. V průběhu zpracovávání práce zakoupila katedra ještě další dvě velikosti objektivů, takže bylo rozhodnuto, že se na etalonu analyzují všechny tři.

Na obr. 23 a 24 je zobrazen navržený etalon, který má dvě části. První částí se rozumí vrchní plocha etalonu. Prvky etalonu zde ve většině případů vystupují ze základny. Aby byl etalon co nejvíce využitelný, vytvořilo se i několik prvků na spodní části. Všechny prvky vyskytující se na spodní ploše jsou zapuštěny do tělesa. Etalon se tak na tuto plochu může postavit, což vede k usnadnění jeho výroby a jeho přípravy pro skenování. Ta spočívá v nalepování referenčních bodů a nanesení nástřiku. Ze stejného důvodu je volena jednotná maximální výška prvků na vrchní ploše, na které je tak možné etalon případně postavit při přípravě druhé strany.



Obr. 23: Navržený etalon v softwaru CREO Elements – vrchní strana

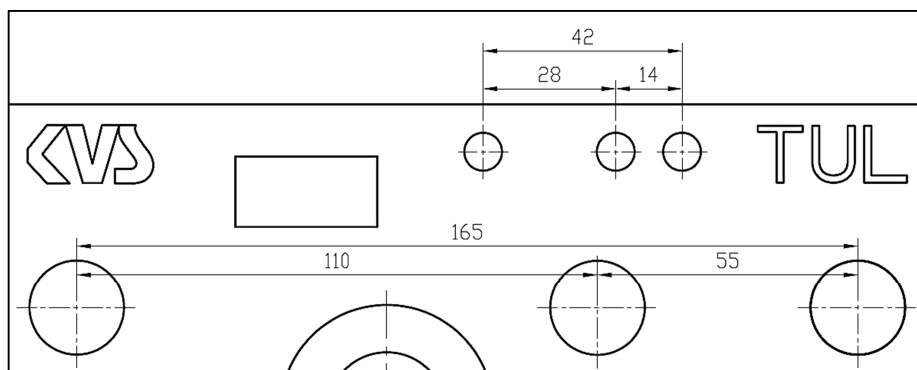


Obr. 24: Navržený etalon v softwaru CREO Elements – spodní strana

7.1.1 Popis analyzovaných rozměrů a prvků etalonu

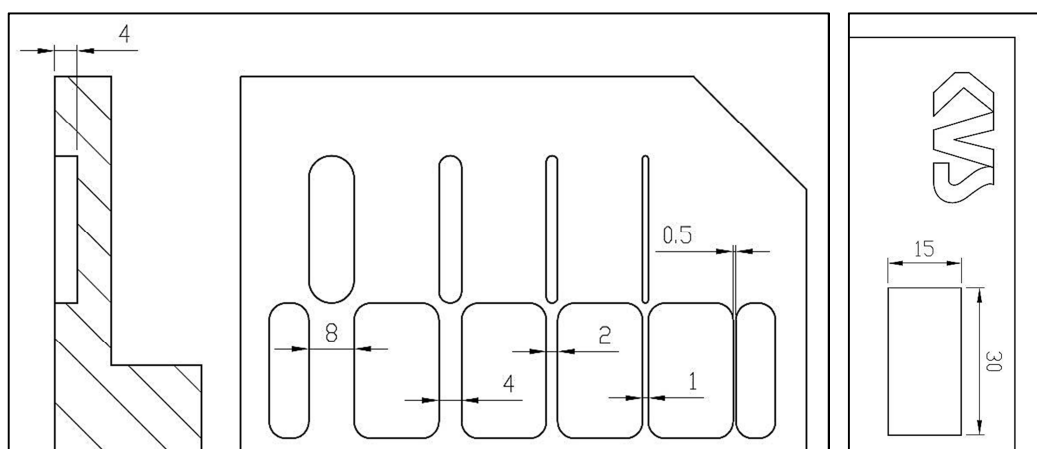
V textu této kapitoly jsou popsány rozměry jednotlivých prvků či rozměry mezi nimi, na nichž byla analyzována přesnost skenování. Tyto rozměry tvoří čtyři samostatné skupiny. Jsou jimi rozměry roztečí, délkové rozměry mezi dvěma rovnoběžnými rovinami, průměry válců a válcových otvorů.

Dvojice tří kulových prvků byla vytvořena k měření rozměru jejich roztečí. Právě na roztečích kulových objektů lze nejlépe měřit délkové rozměry. Měří se totiž vzdálenost jejich středů a ne dvou ploch, které nemusejí být rovnoběžné a spojitého tvaru. Vzdálenosti mezi kulovými prvky byly voleny tak, aby vždy jedna vzdálenost byla určitým násobkem ostatních dvou. Tak vznikl soubor rovnoměrně odstupňovaných délkových rozměrů. Sestava kulových objektů byla vytvořena ve dvou skupinách pro dva různé průměry. Celkem je tímto k dispozici šest různých rozměrů roztečí. Měřitelné údaje jsou okótovány na obr. 25 s rozměrovými údaji odpovídajícími CAD modelu.



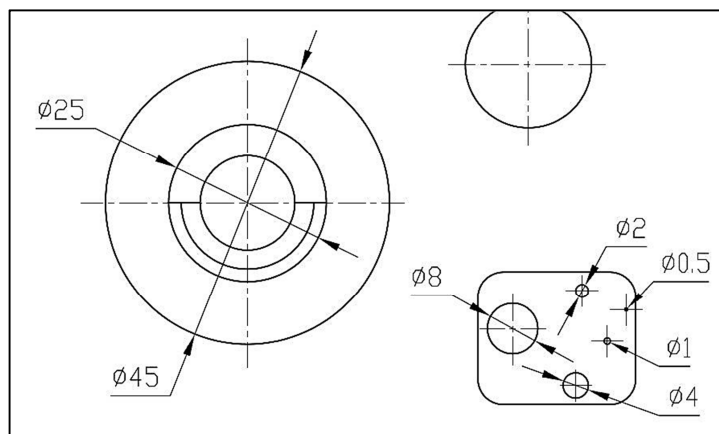
Obr. 25: Rozteče kulových prvků

Přesnost skenování délkového rozměru mezi dvěma rovinami se analyzovala celkem na devíti prvcích. Prvními pěti rozměry byly šíře žeber vyskytujících se na spodní straně etalonu, které doplnily dva délkové rozměry kvádrů z vrchní strany. Podobně jako u ostatních prvků jsou jednotlivé rozměry vzájemně odstupňovány. Kóta s vyšším rozměrem je dvojnásobek kóty nižší. Poslední dva rozměry, jež jsou řádově vyšší, tvoří výška a délka etalonu o rozměrech 100 a 200 mm. Soustava žeber je dále doplněna jejich teoretickými protikusy v podobě drážek o stejném rozměru. Z důvodů výrobitelnosti chybí pouze drážka o šířce 0,5 mm. Skupiny žeber a drážek se na etalonu nacházejí také za účelem zjištění, které prvky o dané šíři dokáže skener zachytit a které nikoli.



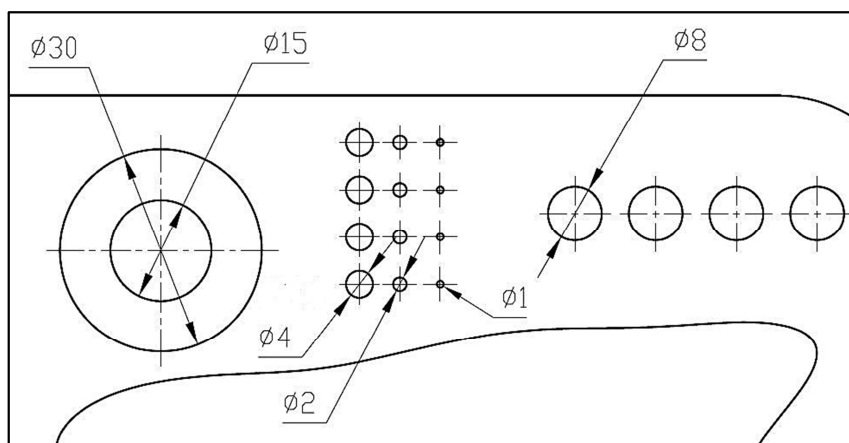
Obr. 26: Délkové rozměry mezi rovnoběžnými plochami

Válcové objekty jsou rozděleny do dvou skupin. První z nich představuje dvojice sousedních válců o větších hodnotách průměru v porovnání s druhou skupinou. Ta je dána pěti válci, které spolu tvoří určitý detailní prvek. Zejména válce s nejmenšími průměry jsou vytvořené za účelem zjištění limitů skenovacích zařízení. Přesnost zachycení rozměrů se analyzovala pro pět největších průměrů válců.



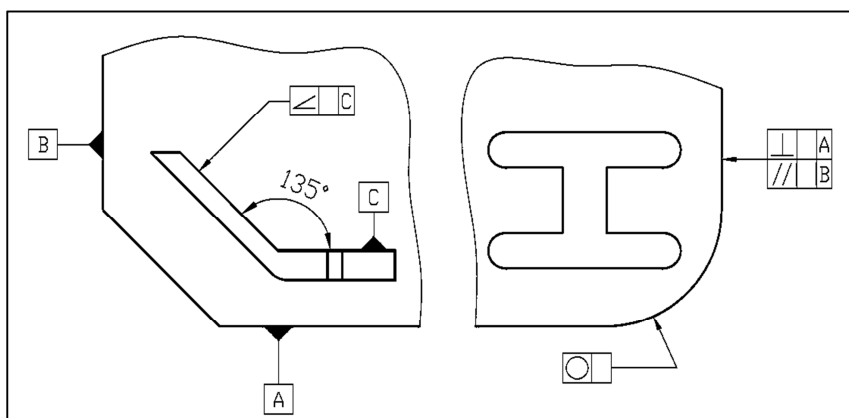
Obr. 27: Válce

Protikladem ke skupinám válců jsou soustavy válcových děr odstupňovaných průměrů. První z nich, ležící na obrázku zcela vlevo, představuje dva válcové otvory se společnou osou a větším rozměrem průměrů. Zbývající otvory jsou rozděleny do čtyř sad, přičemž v každé sadě se nacházejí čtyři otvory stejného průměru a rozdílné hloubky (0,5; 1; 2; 4 mm). Sledoval se jak průměr otvorů (mimo $\varnothing 1$), tak i schopnost skeneru zachytit všechny válcové otvory.



Obr. 28: Válcové otvory

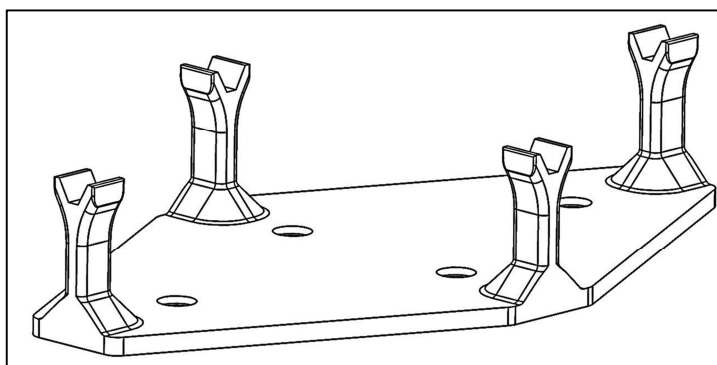
Mimo analýzy rozměrové přesnosti došlo k analyzování tvarové a směrové přesnosti vybraných prvků. Tvar se sledoval na vybraných objektech, u kterých lze měřit odchylku od jejich ideálního tvaru. Ta se zjišťovala pomocí funkcí geometrických tolerancí. Zkoumala se tedy odchylka válcovitosti vnější i vnitřní geometrie na objektu válce a otvoru. Dále potom kruhovitosti řezu zaoblení, jenž se vykytuje na pravém dolním rohu etalonu. Analyzovaným prvkem se stal též kvádr, u něhož se měřila rovinnost vrchní plochy. Při zkoumání směru bylo zjišťováno odchýlení sklonu stěn úhlového prvku od ideálního úhlu, který spolu svírají. Nakonec se stanovila i odchylka rovnoběžnosti a kolmosti bočních ploch etalonu.



Obr. 29: Některé prvky, u nichž se analyzovala přesnost tvaru a směru

7.2 Návrh skenovacího přípravku

Na většinu objektů je nutné před každým skenováním nanést vrstvu zmatňujícího přípravku. Ovšem při doteku s povrchem objektu se nanesená vrstva snadno setře a nástřík se musí aplikovat znovu. Bylo tedy na místě nějakým způsobem zajistit, aby se při měření etalonů této nepříjemnosti předcházelo. Přesněji mít k dispozici možnost manipulace s etalonem bez toho, aby se ho člověk musel dotknout. Dalším námětem, který by zrychlil a zefektivnil proces skenování, byl požadavek využití otočné a naklápěcí jednotky dostupné na katedře výrobních systémů. To bylo možné za předpokladu vytvoření určitého držáku etalonu, jenž by se upnul na stůl jednotky. K uspokojení výše zmíněných požadavků došlo k návrhu a výrobě skenovacího přípravku. Do návrhu etalonu byly zakomponovány otvory se závity přesně uprostřed každé jeho stěny. Do otvorů je poté umožněno zašroubovat vhodné šrouby. Jejich uchopením je zajištěna manipulace s objektem bez otěru nástříku. Šrouby by měly mít dlouhé válcové dřívky. Povrchem těchto dřívků se etalon usadí do čtyř prizmatických lůžek tvořících stojan přípravku. Lůžka jsou spojena rovinnou základnou, z níž vystupují a která je opatřena otvory pro upnutí na stůl otočné jednotky. Prizmatický tvar lůžek a středové umístění šroubů zajišťuje nehybné ustavení etalonu při pohybu a naklápění jednotky. Navržené rozevření prizmatu dovoluje bezpečné naklápění etalonu do úhlu 45° .



Obr. 30: Skenovací přípravek

7.3 Výroba etalonů

Na katedře výrobních systémů jsou k dispozici zařízení umožňující rychlou výrobu prototypů, tzv. 3D tiskárny. V roce 2011 přibyla do vybavení laboratoří jedna

z nejmodernějších tiskáren na trhu. Jedná se o typ Objet Connex 500 využívající technologii PolyJet Matrix, jež dovoluje tisk funkčních sestav ze dvou odlišných plastických materiálů. Tloušťka tisknutelné vrstvy určující přesnost tisku odpovídá dle výrobce až 16 μm . Jednou alternativou výroby etalonu byl tedy zvolen tisk a proběhl právě na této tiskárně. Etalon byl vytisknut v počtu dvou kusů (označeny byly písmeny A a B) spolu s přípravkem, na který se etalon ustaví při skenování za použití otočného stolu. Tisknutým materiálem byl tuhý, neprůhledný fotopolymer VeroGray RGD850.

Vytištěné kusy doplnil ještě jeden etalon zhotovený konvenčním způsobem výroby, jímž bylo obrobení z kovu. Výroba byla uskutečněna frézovacími operacemi na tříosém obráběcím centru s vertikální osou vřetene. Použitý stroj, Tajmac MCFV1680, obrábí s přesností $0,03 \div 0,05 \text{ mm}$. Materiálem posledního etalonu je slitina hliníku. Ta byla volena z důvodů jejího běžného využití v praxi a též kvůli její nízké hustotě, jež umožňuje použití vytištěného přípravku i pro tento kovový etalon (označen písmenem C).



Obr. 31: Tisk etalonu na zařízení Objet Connex 500

7.4 Měření na souřadnicovém měřicím stroji

Sledované rozměry etalonů se po výrobě samozřejmě lišily od rozměrů CAD modelu. Aby se mohla analyzovat přesnost snímání skenerů, bylo nezbytné stanovit

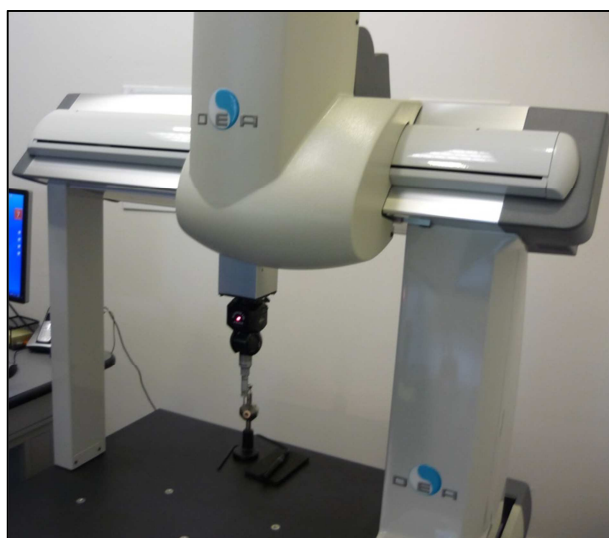
reálnou velikost porovnávaných rozměrů. Přesnost měření použitých skenerů se obecně nachází v řádu setin až desetin milimetru, proto se muselo volit měřicí zařízení s vyšší přesností. Požadovanou podmínku přesnosti měření splňují souřadnicové měřicí stroje, které dokáží měřit s přesností v mikrometrech.

Měření proběhlo ve firmě Steinel na tříosém SMS DEA GLOBAL Status 7.10.5 od výrobce Hexagon Metrology. Při měření se použila spínací doteková sonda s kulovým rubínovým dotekem a hlavou Renishaw PH10M. Kalibrační list stroje uvádí přesnost stroje a nejistotu měření dle následujících vztahů.

- $MPE_E = 2,5 + \frac{L}{300} \mu m$ $L \dots$ měřená délka v mm (9)

- $MPE_P = 2,5 \mu m$ (10)

- $U = (0,2 + 2 \cdot l_n) \mu m$ $l_n \dots$ měřená délka v m (11)



Obr. 32: Použitý SMS DEA GLOBAL Status 7.10.5

7.4.1 Vyhodnocení naměřených hodnot

Podkladem pro analýzu přesnosti skenerů jsou získaná data z SMS. Než se ovšem mohly výsledky měření použít, muselo se provést ověření, zda neobsahují chybné údaje. Tím je myšlen výskyt hrubých chyb. Z důvodu výskytu chyb náhodných se pro každý sledovaný rozměr vypočetl aritmetický průměr jeho hodnot získaných z pěti provedených měření a standardní nejistota typu A korigovaná pro pět měření. Následně se s použitím kalibračního listu SMS dopočetla standardní nejistota typu B. Z těchto dvou hodnot byla získána kombinovaná nejistota a nakonec celková rozšířená nejistota

měření pro pravděpodobnost 95%. Při měření rozměrů kovového etalonu byla opakovatelnost měření velmi dobrá a hodnoty z opakovaných měření si v podstatě odpovídaly. Maximální velikost intervalu nejistoty se pouze pro jednu sledovanou hodnotu pohybovala v rozmezí $\pm 0,002$ mm. Intervaly ostatních hodnot se vyznačovaly krajními chybami pod tímto číslem v řádu tisícín až desetitisícín mm. Vezme-li se v úvahu fakt, že výsledky analýzy přesnosti skenerů se budou uvádět v řádu setin mm, mohl se za skutečnou hodnotu rozměru považovat spočtený aritmetický průměr.

V případě měření tištěných etalonů již výstupy tak jednoznačné nebyly. Výsledky jednotlivých měření se od sebe odlišovaly i v řádu setin milimetrů. Přičemž velikost většiny hodnot v jednotlivých měřeních se měnila podle určité zákonitosti. Konkrétněji by se dalo říci, že když byl měřen vnější rozměr, jeho velikost s každým dalším měřením klesala. A při měření vnitřních rozměrů (průměrů otvoru) byl tento trend opačný, velikost rozměru tedy rostla. Mezi čtvrtým a pátým měřením se poté u některých hodnot rozměry nelišily v takovém rozsahu, jako tomu bylo v prvních třech sériích. Z toho by se dalo usuzovat, že jednotlivé odchylky nejsou způsobeny pouze působením náhodných vlivů. V případě měření kovového etalonu totiž jejich vliv měnil řád tisícín milimetru a to nepravidelně nahoru i dolů. Vypadá to tedy, že výsledky byly ovlivněny zejména plastovým materiálem měřených etalonů. Etalon byl při tisku vyroben nanášením vrstev fotopolymery na sebe. Vrstva plastického materiálu mohla být na povrchu etalonu nehomogenní a lehce proniknutelná. Případně to mohlo být způsobeno přítomností podpůrného materiálu. Ten se tisknul spolu se základním materiálem, kde podpíral a obklopoval tištěnou konstrukci. Po dokončení tisku byl odstraněn vodním proudem. Avšak na povrchu etalonu mohla zůstat jeho nepatrná vrstva. Při měření tak dotek sondy mohl postupně pronikat touto vrstvou až do určité hloubky, na které se téměř ustálil. Z těchto důvodů se tištěné etalony nakonec k analýze nevyužily. K objektivnímu provedení analýzy byly vyhodnocovány pouze hodnoty naměřené na etalonu C. Hodnoty změřených rozměrů jsou uvedeny v příloze II.

7.5 Skenování etalonu a průběh inspekce naskenovaných dat

Proces skenování etalonu byl proveden na dvou zařízeních, jak určuje zadaný cíl práce. Pro snímání objektu optickým skenerem ATOS II bylo použito trojice

vyměnitelných objektivů. Každý objektiv má rozdílné rozlišení a definuje odlišný měřicí objem. To znamená, že každý objektiv je vhodné použít pro jiné velikosti skenovaných objektů. Etalony se dále nasnímalý skenerem RevScan, jehož měřicí objem se upravuje softwarově a jeho velikost ovlivňuje rozlišení naskenovaných dat.

Podmínky měření se výrazně neměnily po celou dobu skenování etalonů zmíněnými zařízeními. Teplota okolí se pohybovala v rozmezí $20 \div 23^{\circ}\text{C}$ a osvětlení v místnosti bylo redukováno za pomoci neprostupných okenních rolet.

Po naskenování byla data vyhodnocena v inspekčním softwaru GOM Inspect. Průměry otvorů a válců se zjišťovaly prokládáním fitting elementy Gaussovým best-fitem pro 3σ . Veškeré délkové rozměry mezi dvěma plochami byly nejprve změřeny pomocí funkce Caliper. V některých případech se nepodařilo všechny plochy kompletně naskenovat a jejich povrch byl „zvlněný“. Příslušný rozměr se tak musel měřit pro různé skeny v jiných místech. Aby byla možná inspekce délky ve stejných místech, byla volena jiná strategie měření. Obě plochy, mezi kterými se měřila vzdálenost, se proložily rovinami (opět Gauss best-fit pro 3σ). Délkový rozměr se poté měřil mezi body vloženými do těchto rovin.

Skenování etalonu bylo pro obě zařízení (u ATOSE pro každý objektiv) provedeno celkem pětkrát. Pro každý rozměr se pak vypočítal aritmetický průměr jeho zjištěných hodnot a nejistota měření. Předmětem analyzování přesnosti snímání byl rozdíl této střední hodnoty a té, která se získala z měření na SMS. Hodnoty rozměrů naskenovaných dat se nachází v příloze III \div VI. V práci jsou dílčí výsledky, pro větší přehlednost, zobrazeny v grafech pro skupiny identických prvků s rozdílnými rozměry.

7.5.1 Skenování skenerem ATOS II

A. Snímání objektivem 55 (SO)

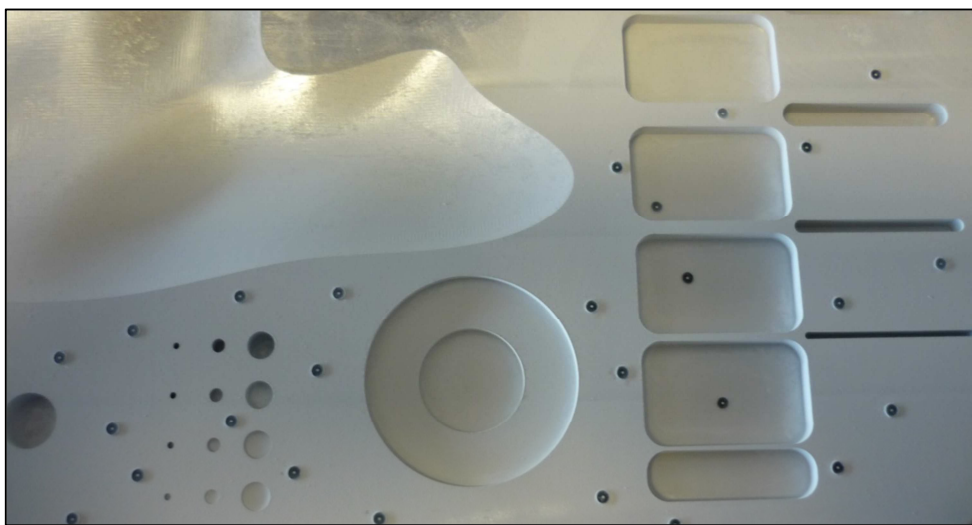
Technické parametry objektivu:

- | | |
|-------------------------------|-----------------|
| • Měřicí objem: | 55 x 44 x 30 mm |
| • Rozlišení: | 0,04 mm |
| • Ohnisková vzdálenost kamer: | 35 mm |
| • Měřicí vzdálenost: | 300 mm |

Objektiv označovaný 55 či SO (small objects) je primárně využíván pro snímání velmi malých objektů či různých detailů. Pro potřeby diplomové práce byly tímto objektivem naskenovány prvky s velmi malými rozměry, mezi které patřila soustava menších kulových objektů, otvorů, válců a žeber s drážkami.

Příprava a skenování etalonu:

Na začátku měření se musel etalon připravit k naskenování. Příprava začala omytím tělesa etalonu od nečistot vzniklých při měření na SMS a následném transportu do měřicí místnosti. Po důkladném vysušení proudem stlačeného vzduchu se na povrch objektu musely nalepit referenční body. Pro objektiv SO se použily miniaturní body o rozměru 0,4 mm. Jakmile byl do okolí snímaných detailů nalepen potřebný počet bodů, nanesl se zmatňující nástrík etalonu. Vrstvička snižující reflexivitu objektu byla tvořena titanovou bělobou. Jelikož nástrík při aplikaci zakryje i nalepené body, je nutné jejich očištění. Skener by je jinak nedokázal rozeznat. Odkrytí bodů se provádí např. pomocí vaty. Popsaná práce s miniaturními body je velice obtížná a vyžaduje nutnou dávku trpělivosti a zručnosti. Příprava tak byla časově náročnější.



Obr. 33: Část etalonu s nástríkem a referenčními body (Objektiv SO)

Při skenování byla měřicí hlava upnuta v pevné pozici nad otočnou a naklápěcí jednotkou, přičemž optická rovina kamer byla kolmá k rovině pracovního stolu. Malý měřicí objem v některých případech neumožnil naskenovat detail v celé své délce. Většina plánovaných snímků tak byla provedena na dvakrát po změně pozice otočné jednotky translací na pracovním stole. Jako první se naskenovaly objekty s vnější

geometrií. Těmi byly kulové prvky a válce. Jejich skenování nebylo nijak složité, neboť jsou dobře viditelné z různých úhlů. Pro zaznamenání kompletního tvaru stačilo sejmutí prvků ve vertikálním směru a poté pod úhlem 45°, čehož se docílilo nakloněním naklápěcí a otočné jednotky. Snímky byly vytvořeny vždy po otočení jednotky o úhel 45° kolem vertikální osy. Složitější na naskenování byla určitě vnitřní geometrie otvorů a drážek. Skenování proběhlo nejprve dle stejného postupu jako u vnější geometrie. Ovšem při sklonu objektu pod úhlem velikosti 45° se nepodařilo dostatečně sejmut vnitřní stěny prvků. Došlo tak k další sérii fotografií s etalonem nakloněným pod úhlem cca 25°, což v některých případech pomohlo.

B. Snímání objektivem 250

Technické parametry objektivu:

- Měřicí objem: 250 x 200 x 200 mm
- Rozlišení: 0,18 mm
- Ohnisková vzdálenost kamer: 23 mm
- Měřicí vzdálenost: 730 mm

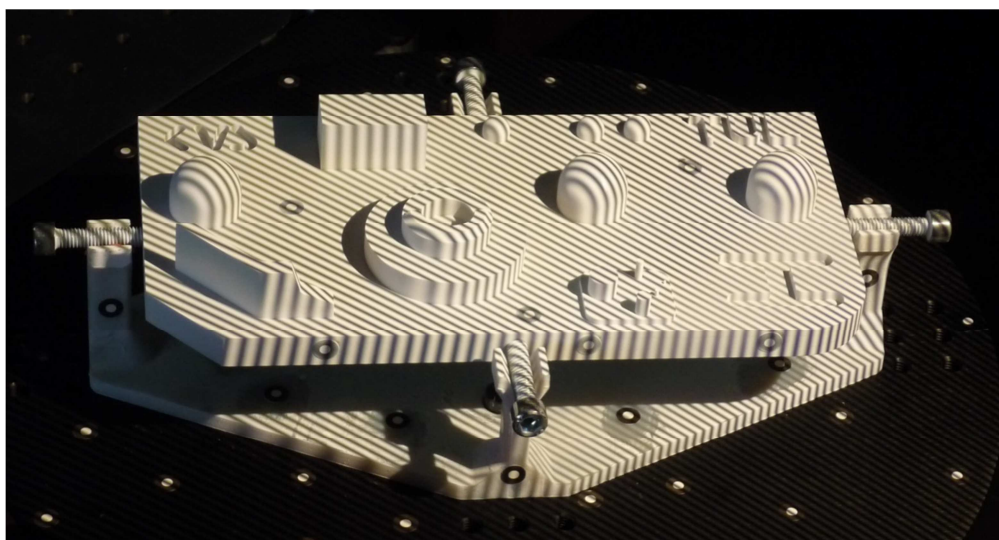
Příprava a skenování etalonu:

Postup přípravy etalonu byl stejný jako v předchozím měření. Po omytí se na povrch opět nalepily referenční body a nanas zmatňující nástrík. Nástrík již zůstal na povrchu i pro všechna další měření (tedy i pro objektiv 700 skeneru ATOS a skener RevScan) z důvodů vzájemného porovnání výsledků za předpokladu stejné výšky vrstvy. K výměně starých bodů za nové došlo vždy za pomoci pinzety.

Rozměr nalepovacích referenčních bodů pro objektiv 250 se odlišoval od těch předchozích. Jejich průměr měl velikost 3 mm. Dále se pak na povrch etalonu mohl nalepit menší počet těchto bodů, jelikož se vyskytovaly také na skenovacím přípravku a na stole otočné jednotky. Čas přípravy objektu pro skenování byl tímto redukován.

Měřicí hlava byla při měření s objektivem 250 upnuta na polohovatelném stativu. Hlavu tím bylo možno napozicovat do různého úhlu a polohy kolem pracovního stolu. Měřicí objem použitých objektivů umožňoval sejmut těleso etalonu v celé jeho délce najednou. Za tohoto předpokladu bylo možno měření do jisté části automatizovat.

Softwarově lze totiž nastavit postupné otáčení jednotky o určitý úhel v rámci jedné otáčky jednotky. Po natočení je vždy automaticky provedeno naskenování dané pozice. Snímalo se opět kolmo k základně etalonu a pod úhly 25 a 45°, ze stejných důvodů jako v předešlém měření. Měření proběhlo ve dvou sériích, nejprve se naskenovala vrchní část etalonu. Poté došlo k jeho otočení v přípravku a následovalo vytvoření druhé série snímků. Pomocí referenčních bodů umístěných na bocích etalonu, které byly zaznamenány v obou měřicích sériích, došlo ke spojení těchto sad snímků. Vznikl tak kompletní digitální model etalonu.



Obr. 34: Průběh snímání etalonu (Objektiv 250)

C. Snímání objektivem 700

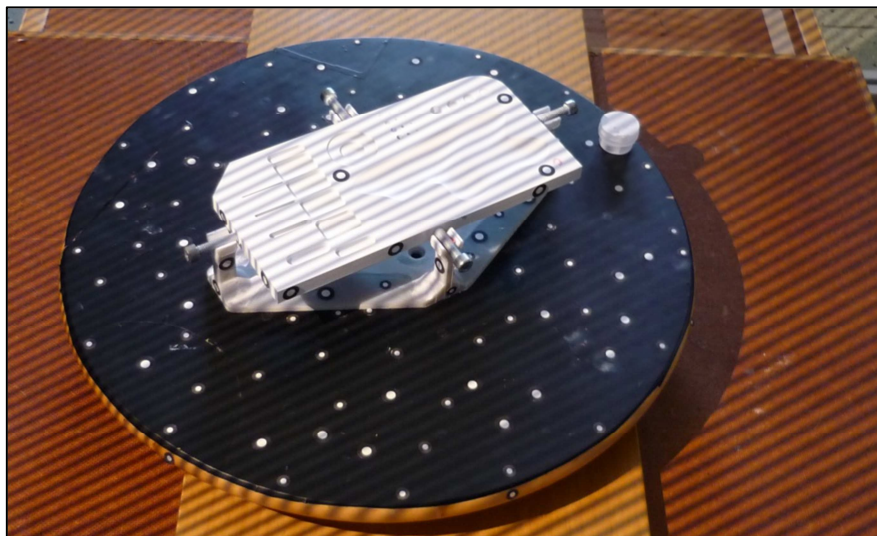
Technické parametry objektivu:

- Měřicí objem: 700 x 560 x 560 mm
- Rozlišení: 0,50 mm
- Ohnisková vzdálenost kamer: 12 mm
- Měřicí vzdálenost: 1030 mm

Příprava a skenování etalonu:

Z technických parametrů lze vyčíst, že pro skenování je nezbytné zajistit relativně velkou vzdálenost objektu od skeneru. Z tohoto důvodu se skenovalo na otočné kruhové podložce umístěné na podlaze laboratoře. Na podložku, pokrytou černou

tapetou, se nalepily referenční body, tentokrát o průměru 5 mm. Stejné body se musely nanést také na přípravek a etalon. Při skenování byl objekt uložen ve skenovacím přípravku a změna jeho pozice byla provedena ručně natočením podložky. Etalon se sejmul podle podobného scénáře jako při měření objektivem 250.



Obr. 35: Průběh snímání etalonu (Objektiv 700)

7.5.2 Skenování skenerem RevScan

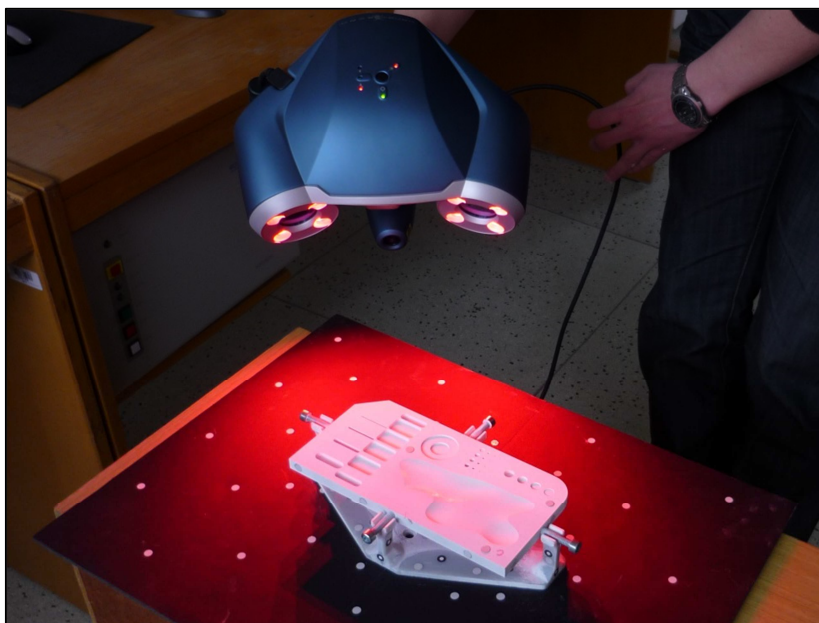
Technické parametry skeneru RevScan:

- Zvolený měřicí objem: 220 x 220 x 220 mm
- Rozlišení: 0,43 mm
- Měřicí vzdálenost: 300 mm

Příprava a skenování etalonu:

Skener RevScan může též snímat jen ty objekty, u nichž je potlačen lesk jejich povrchu. I v tomto případě byl měřen etalon s provedeným nástřikem. Referenční body, jež se musely opět nalepit na povrch, se odlišují od těch používaných při práci s předchozím zařízením. Povrch značek již netvoří dvoubarevný potisk soustředných kruhů, ale pouze jednobarevná vrstva reflexního charakteru. Systém skeneru bod při snímání identifikuje na základě odrazení vyzařovaného světla od povrchu značky. Jejich rozměr je velmi blízký bodům pro objektiv 250.

Před skenováním se etalon, uložený ve skenovacím přípravku, umístil na speciální podložku. Na podložce byly též nalepeny body z důvodu větší flexibility pohybu se skenerem. Z různých pozic a natočení nad podložkou tak skener viděl dostatečný počet bodů. Pro zaznamenání skenovaných dat byl použit software VX Elements, jehož prostřednictvím se skener ovládá. Před započítím snímání povrchu bylo nejprve nutné naskenovat body na podložce a přípravku s etalonem. Skener v tomto případě nepromítá laserový kříž, ale pouze osvětluje prostor před sebou červeným světlem. Jak již bylo řečeno, osvětlením bodů dochází k jejich rozpoznání a uložení jejich pozice do systému. Jakmile byl naskenován dostatečný počet bodů, přepnul se v softwaru režim snímání bodů na snímání povrchu. Proces skenování spočíval v ručním natáčení a přesouvání zařízení do různých pozic tak, aby byl povrch co možná nejlépe zachycen.



Obr. 36: Průběh snímání etalonu (RevScan)

7.6 Limity skenování detailních prvků

Součástí analýzy přesnosti je též nalezení limitů schopnosti skenerů zachytit detailní prvky o velmi malém rozměru. Tato kapitola je umístěna před vyhodnocení rozměrové inspekce, jelikož informace o skenovatelnosti některých prvků ovlivnily její výstupy. Při určení limitů skenování se sledovaly čtyři skupiny různých prvků, jimiž byly válce, válcové otvory, soustava žebër a drážek.

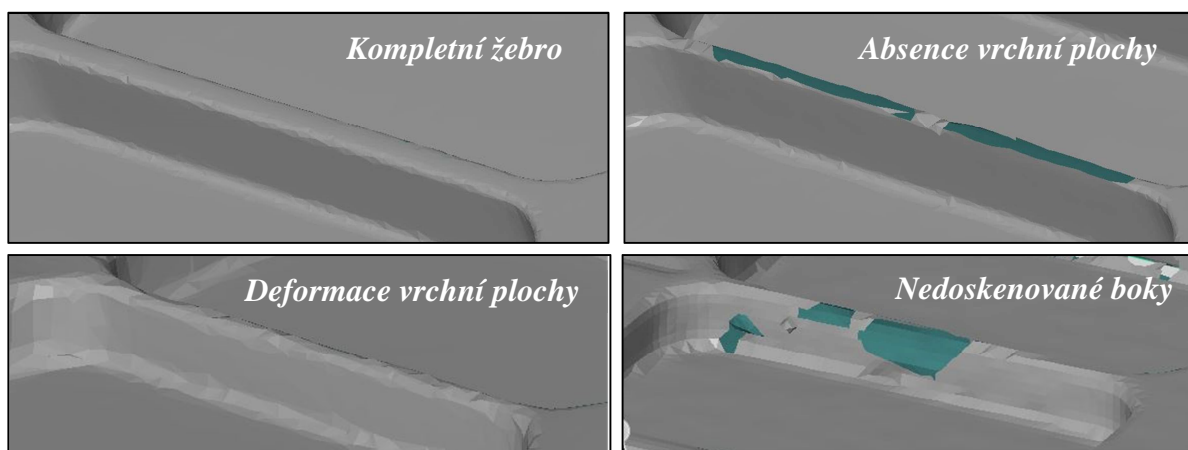
Přehled měřených prvků:

- Žebra šířka 0,5 mm; 1 mm; 2 mm; 4mm; 8 mm
- Drážky šířka 1 mm; 2 mm; 4mm; 8 mm
- Válce průměr 0,5 mm; 1 mm; 2 mm; 4 mm; 8 mm
- Otvory průměr 1mm; 2mm; 4 mm; 8 mm

Samozřejmě se při opakovaném skenování vždy nepodaří zachytit stejnou úroveň naskenované geometrie daného prvku. Proto se dále hodnotí nedostatky, jež se vyskytovaly ve většině skenovacích cyklů. Informace o schopnosti skeneru zachytit detailní prvky se zpracovaly do pruhových grafů. Každý z nich zobrazuje změnu stavu prvku s jeho rostoucím rozměrem současně pro všechna použitá snímací zařízení najednou. V grafech je vždy zaznamenán daný stav prvků od rozměru, kdy se tento stav změnil až do hodnoty rozměru, ve kterém došlo k jeho další změně. Z toho důvodu graf pokrývá i ty rozměry, jež se nacházely mezi těmi sledovanými. Tímto je tedy možné určit od jakého rozměru a v jakém stavu je každý prvek naskenovatelný pro uvedená zařízení. Hodnotily se tři možné stavy. Buď byl prvek kompletně zachycen, nebo byla jeho geometrie neúplná, či poškozená, anebo nebyla zachycena vůbec.

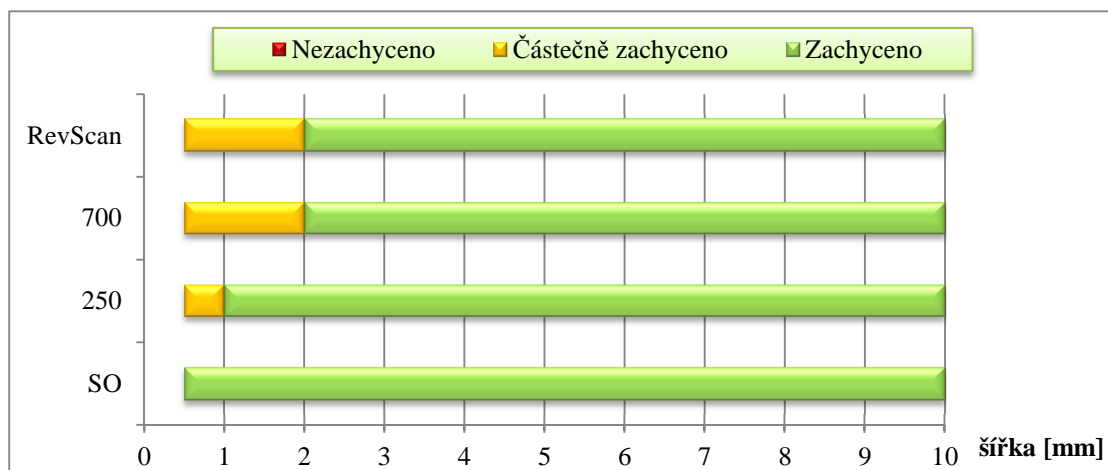
7.6.1 Žebra

Žebra se víceméně podařilo naskenovat všemi snímacími zařízeními. K hodnocení byly tedy využity jen první dva možné stavy. Případ částečného zachycení geometrie představoval defekty, jimiž byly absence a deformace vrchní plochy, či nedoskenování bočních stěn.



Obr. 37: Hlediska hodnocení žeber

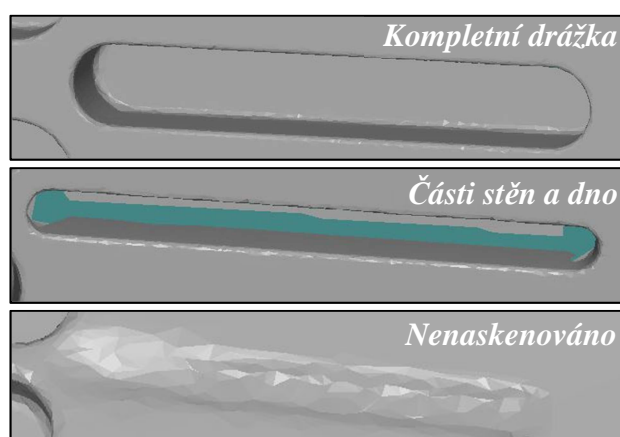
Výsledky potvrzují vhodnost použití objektivu SO ke snímání malých objektů. Dokázal totiž kompletně zachytit i žebra nejmenších šíří. U snímání objektivem 250 se nepodařila zaznamenat vrchní plocha nejužšího žebra. Objektiv 700 měl stejný problém, přičemž navíc vrchní plochu žebra šířky 1 mm sejmul značně zdeformovanou. Skener RevScan tuto plochu a části ploch bočních nezaznamenal u dvou nejužších žeber.



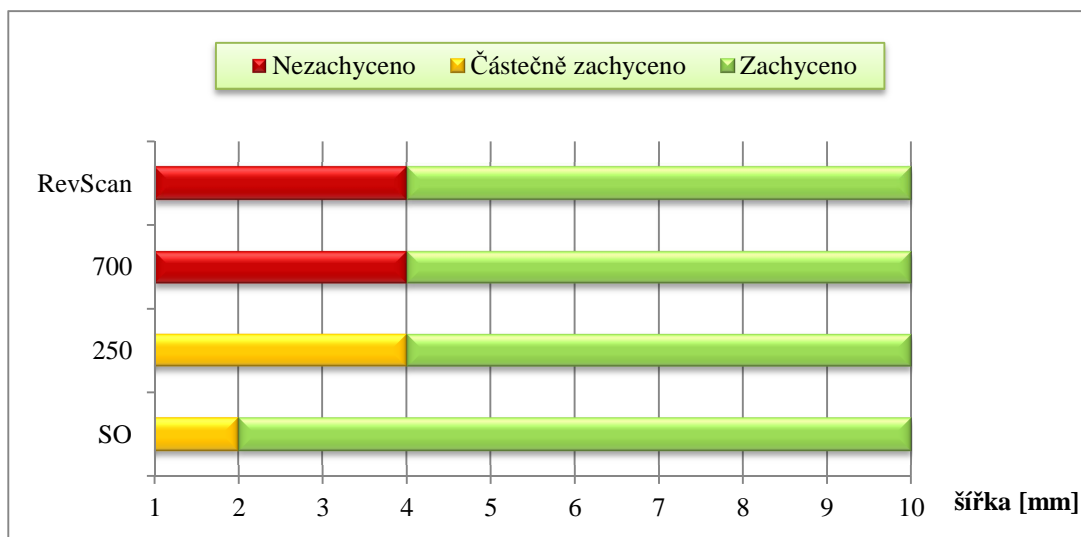
Graf 1: Schopnost skenerů zachytit žebra o malém rozměru

7.6.2 Drážky

Další analyzovanou skupinou se staly teoretické protikusy žeber, jimiž byla soustava drážek. Snímáním jejich vnitřní geometrie se nedosáhlo dobrých výsledků přesně tak, jak bylo předpokládáno. Hodnotící stav částečného zachycení vyjadřuje případy, kdy se povedlo nasnímat pouze dno drážky spolu s částí jejích stěn nebo pouze oné části stěn.

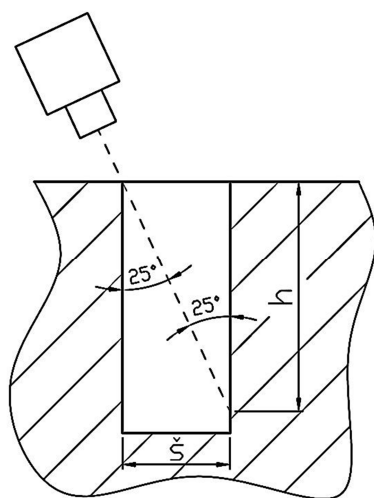


Obr. 38: Hlediska hodnocení drážek



Graf 2: Schopnost skenerů zachytit drážky o malém rozměru

Povrch stěn drážek se snímal s nakloněním skeneru pod úhlem 45° a poté z důvodu jejich zaznamenání do větší hloubky též pod úhlem 25° . Tato volba vycházela z předpokladu optimálního výhledu kamer na co největší plochu stěn drážek. Z posledního zmíněného úhlu se pomocí základní goniometrické funkce odvodil poměr pro limitní pozorovací polohu kamer. Poměr vyjadřuje velikost zachycené hloubky při dané šířce drážky. Platnost vztahu je teoretická a nepostihuje řadu možných vlivů, které mohou působit na konečný vzhled. Teoreticky by tak měly být skenery schopny pod tímto úhlem naskenovat hloubku, která odpovídá dvojnásobku šířky. Musí se ovšem brát v úvahu rozlišovací schopnosti skenerů, kdy od určitého rozměru skener drážku „nevidí“, či mylně vyhodnotí tvar jejího povrchu.



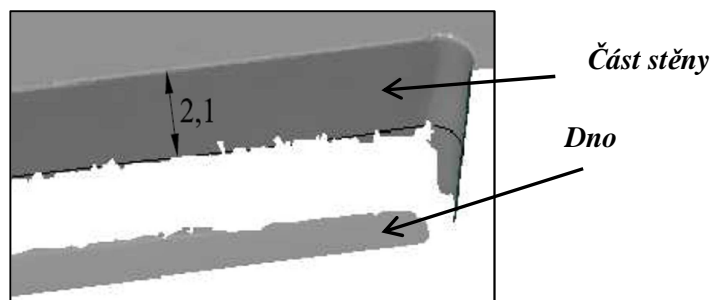
$$\frac{\check{s}}{h} = \operatorname{tg} 25^\circ$$

$$\frac{\check{s}}{h} = 0,47$$

$$\frac{h}{\check{s}} = 2,1 \quad (12)$$

Obr. 39: Odvození vztahu definující skenovatelnost drážek

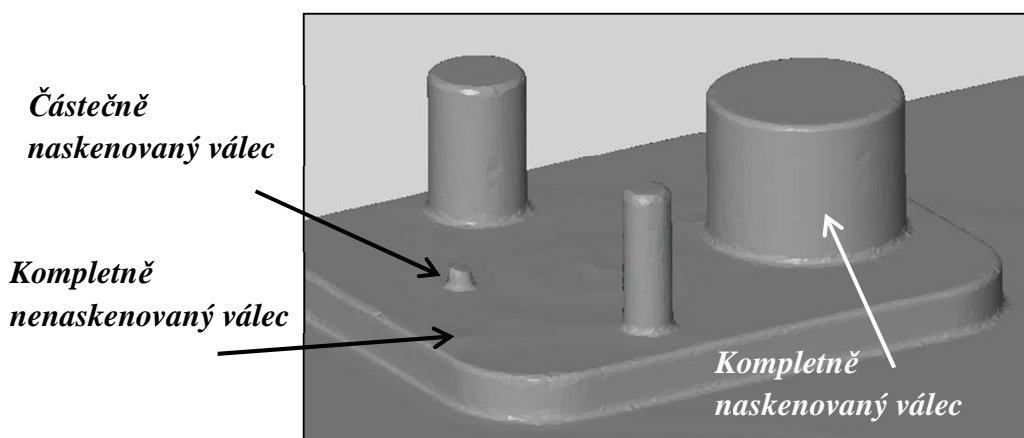
Drážky etalonu jsou 4 mm hluboké. Grafické výsledky (graf 2) objektivu SO platnost vztahu (12) potvrzují. Díky svému vysokému rozlišení zachytil kompletně všechny drážky kromě té nejslabší. Výška její zachycené stěny odpovídala odvozenému poměru. Objektiv 250 nenasnímal drážku šířky 2 mm po celé hloubce. I přes tento menší defekt by se dalo též tvrdit, že se výsledek přibližuje odvozenému vztahu. Objektiv 700 skeneru ATOS a skener RevScan úzké drážky nenaskenovaly z důvodu malého rozlišení, miniaturní rozměry byly už tak pod jejich rozlišovací schopnost.



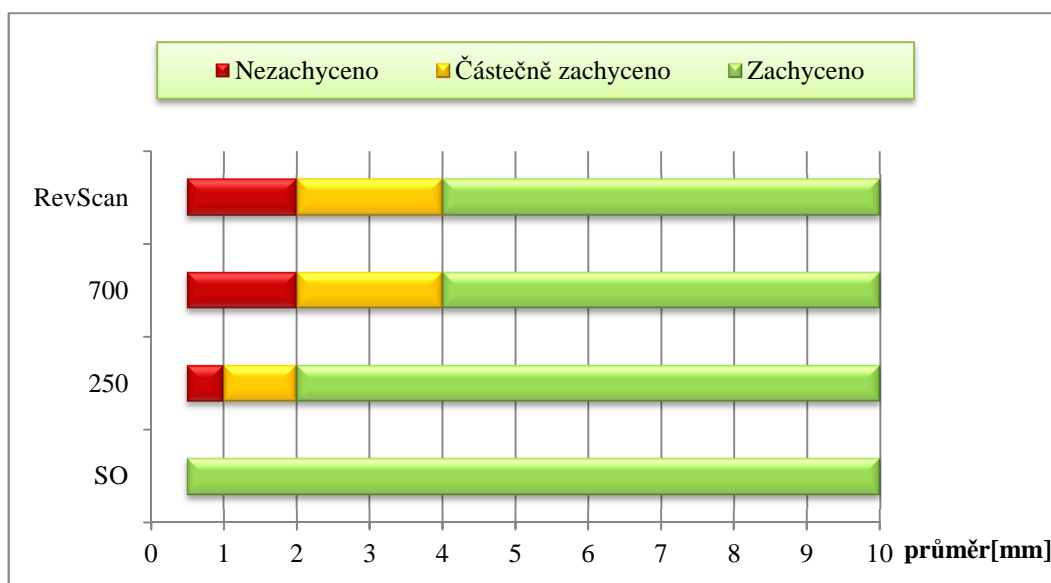
Obr. 40: Řez nejslabší drážkou nasnímanou objektivem SO

7.6.3 Válce

Zcela tvarově odlišnými prvky v porovnání s předchozími skupinami jsou válce. Na válcových objektech se sledovala schopnost skeneru zachytit je v celé jejich délce. Nejčastějším defektem bylo neúplné naskenování válce, jenž spadl do stavu Částečně zachyceno.



Obr. 41: Hlediska hodnocení válců



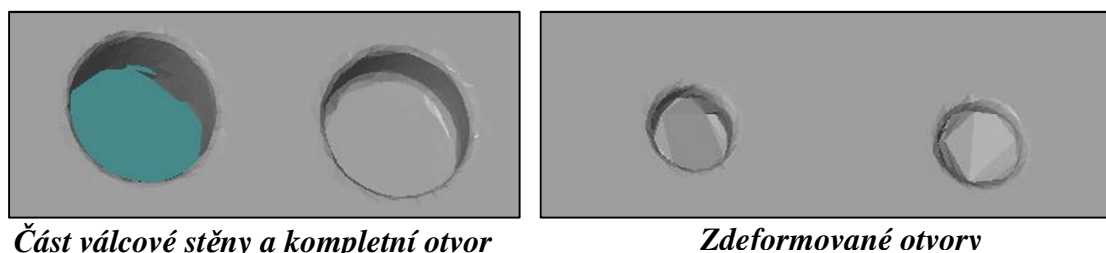
Graf 3: Schopnost skenerů zachytit válce o malém rozměru

Celá sada válcových objektů se podařila naskenovat za použití objektivu SO. Objektiv s označením 250 zachytil kompletně válce s průměry 2 až 8 mm a válec o průměru 1 mm pouze z části, zhruba do jedné poloviny jeho výšky. Se stejnými výsledky, posunutými celkově o jeden stupeň k větším rozměrům, pracoval objektiv 700 a skener RevScan.

7.6.4 Otvory

Analýza válcových otvorů se uskutečnila na větším souboru prvků. Sledovala se čtveřice otvorů různých průměrů se čtyřmi odlišnými hloubkami. Hlediska posouzení schopnosti jejich zachycení byla opět definována třemi stavy. Ne vždy se stejný stav vyskytoval u všech otvorů identických průměru různé hloubky. Zejména otvory s hloubkou 0,5 a 1 mm byly z převážné většiny zdeformované z důvodu velice nízké hodnoty jejich hloubky, a proto se nakonec do hodnocení nezahrnuly. Stav pro danou skupinu průměrů byl tedy volen souhrnně podle otvorů s větší hloubkou. Stav Zachyceno se udělil pouze v případech, kdy byly otvory kompletně zachyceny, nebo když se tomuto stavu blížily (disponovaly větší částí neporušené válcové plochy po celém obvodu). Stav s označením Částečně zachyceno obsahuje případy, kdy se sejmula jen neúplná část válcové plochy otvorů, či byly otvory zdeformované nepříznivou tvorbou polygonální sítě na nedostatečném počtu naskenovaných bodů.

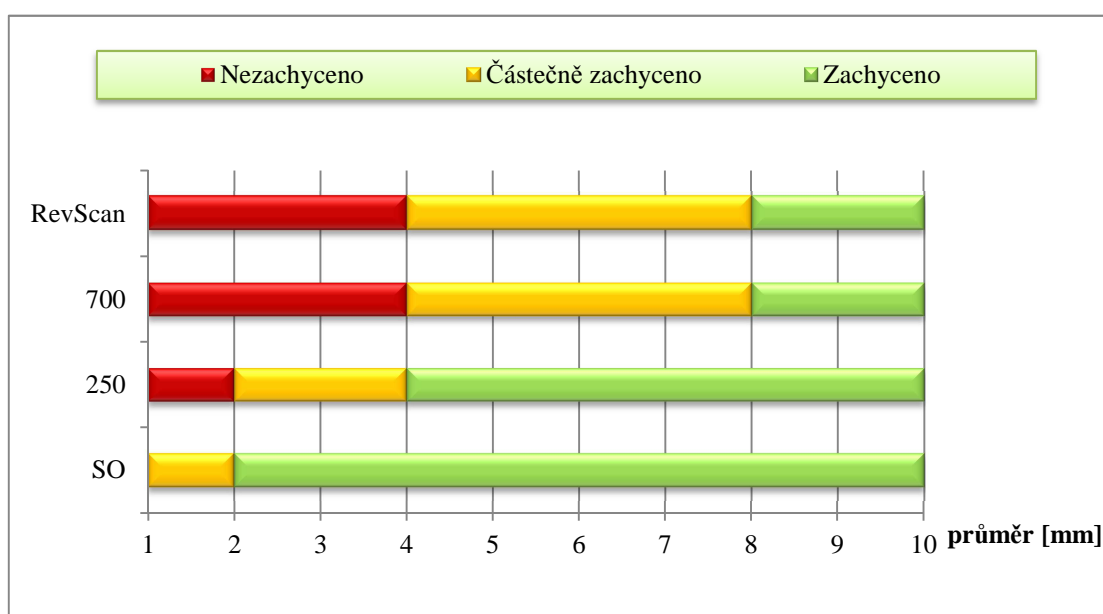
Avšak pouze tehdy, byla-li válcová plocha dostatečná k změření průměru. Poslední hledisko vystihovalo stav, kdy se otvory nepodařilo zachytit, či změřit jejich průměr.



Část válcové stěny a kompletní otvor

Zdeformované otvory

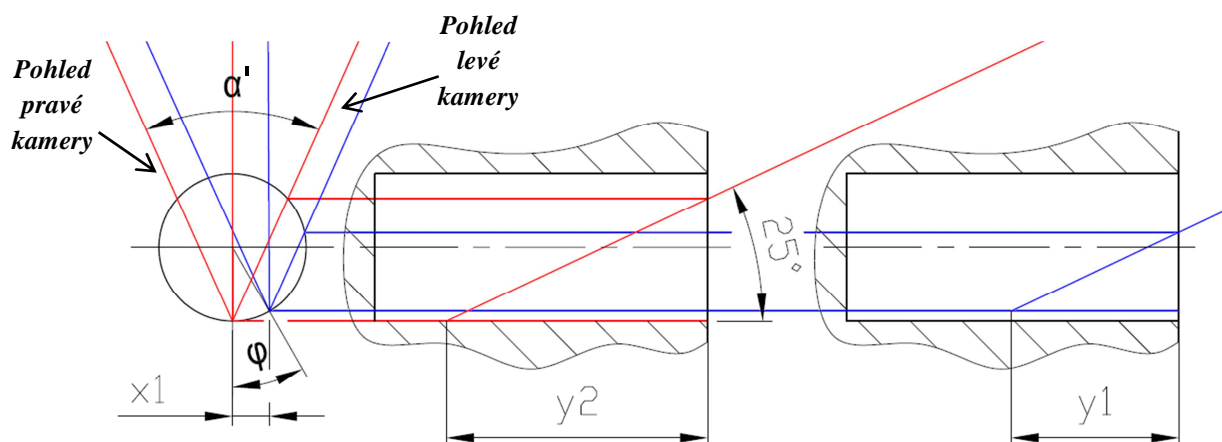
Obr. 42: Hlediska hodnocení otvorů



Graf 4: Schopnost skenerů zachytit otvory o malém rozměru

Podobně jako v případě drážek byl odvozen vztah závislosti nasnímané hloubky otvoru na jeho průměru. Opět pro případ snímání se skenovací hlavou sklopenou pod úhlem 25° . Odvození bylo ovšem o něco složitější. U skenování drážek měly kamery přímý výhled na stěny. Při snímání otvoru byl jejich výhled na válcovou stěnu omezen kruhovým tvarem. Na jeden záběr tak bylo možné zachytit pouze část válcové stěny připomínající plochu paraboly. Pomocí grafické analýzy se našly body, jež tvoří hranici tohoto skenovatelného obrazce. Ten se následně rozvinul do rovinné plochy. V dalším kroku bylo nutné stanovit počet skenů, na který by měla být válcová plocha po obvodu zaznamenávána. Výsledek podílu hodnoty obvodu otvoru a počtu skenů vymezuje část rozvinutého obrazce, která udává, do jaké výšky je možné válcovou plochu kompletně naskenovat (viz obr. 43). Čím více snímků se použije na naskenování

otvoru kolem jeho osy, tím vyšší plocha bude zaznamenána. Zobrazený případ je vytvořen pro snímání objektivem 700 skeneru ATOS II na 8 snímků.



$$x_{10} = \frac{d}{2} \cdot \varphi \quad (13)$$

$$o = \pi \cdot d \quad (14)$$

$$\check{s} = \frac{o}{\text{počet skenů}} \quad (15)$$

α' sklopený úhel kamer

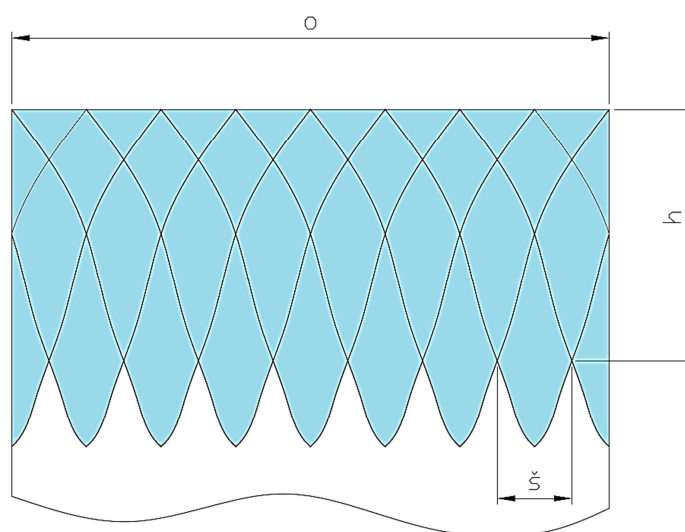
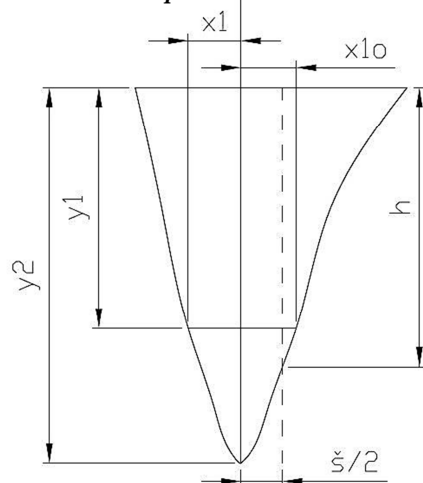
d průměr otvoru

o obvod otvoru

x_{10} délka oblouku

\check{s}, h rozměry plochy z jednoho skenu, která tvoří část kompletní naskenované plochy

$\frac{1}{2}$ skenovatelného obrazce na válcové ploše



Obr. 43: Výňatek z grafické analýzy skenovatelnosti otvoru

Grafická analýza byla provedena pro všechna použitá zařízení. Zjištěné vztahy jsou uvedeny v tab. 2. Je nutno připomenout, že úroveň skenů ovlivňují různé faktory, se kterými teoretický vztah samozřejmě nepočítá. Avšak ve většině případů se přibližuje dosaženým výsledkům.

V případě použití objektivu SO při snímání otvoru hloubky 4 mm a průměru 2 mm, byla zachycena válcová plocha v délce odpovídající zjištěnému vztahu. Otvory o vyšším průměru již zachytil kompletně se dnem. Objektivem 250 byl zaznamenán otvor průměru a hloubky 4 mm takřka po celé délce bez dna. Následující velikost průměru již zaznamenal kompletně. Pro objektiv 700 a skener Revscan již byly výsledky zkreslené z důvodu malého rozměru otvoru vzhledem k jejich rozlišitelnosti. Kompletní otvory byly sejmuty až od velikosti 8 mm.

Tab. 2: Závislost nasnímané hloubky otvoru na jeho průměru

	SO	250	700	RevScan
Úhel kamer α	24°	31°	22°	29° ¹
h / d (pro 8 skenů)	1,2	1,0	1,3	1,1

7.6.5 Shrnutí výsledků prověření limitů skenování detailů

V této části analýzy došlo k ověření předpokladu, že objektiv skeneru ATOS s označením SO je skutečně vhodným ke snímání detailních prvků. Jeho výsledky předčily všechna ostatní použitá zařízení, a to při snímání vnější i vnitřní geometrie. Limity objektivu se objevily u skenování vnitřní geometrie nejmenších prvků. Nejúplnější digitalizované modely etalonu, které byly zachyceny objektivem 250, již disponovaly defekty také geometrie vnější, kdy se objevily problémy se zachycením nejužšího žebra a nejužších válců. Poslední použitý objektiv 700 naskenoval etalon s relativně hrubým povrchem v důsledku svého nízkého rozlišení. I přes zmíněný hendikep byla úroveň zachycení válců a žebířů téměř srovnatelná s předchozím objektivem. Jeho omezení, dané opět nižším rozlišením, tkví v zachycení vnitřních povrchů, kdy kompletně zaznamenal pouze otvory o maximálním průměru a dvě největší drážky. Výsledky skeneru RevScan a objektivu 700 si v podstatě odpovídají. Dalo by se tvrdit, že objektiv 700 skeneru ATOS II a RevScan jsou v oblasti snímání

¹ Úhel kamer výrobce neuvádí. Jeho přibližná velikost byla určena ze známých parametrů skeneru.

detailů vzájemně zaměnitelné. Digitalizované modely vytvořené zařízením RevScan mají ovšem větší tendenci k výskytu trhlin na povrchu sítě, a to na detailních i poměrně rozměrných prvcích. Celkově byl povrch skenů i zde dosti zvlněný a velice hrubý, což není nejlepší předpoklad ke skenování detailních prvků.

7.7 Vyhodnocení rozměrové inspekce naskenovaných dat

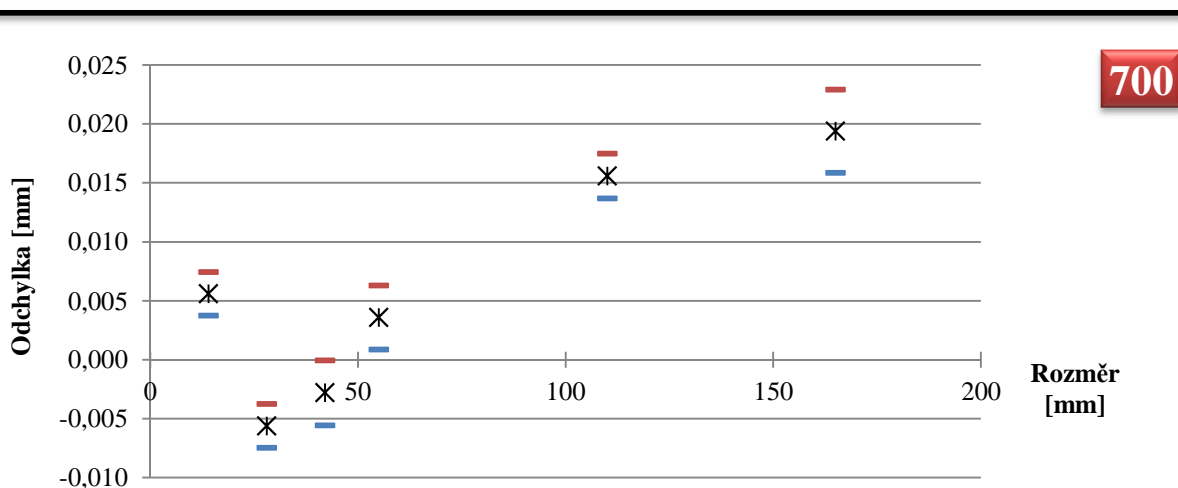
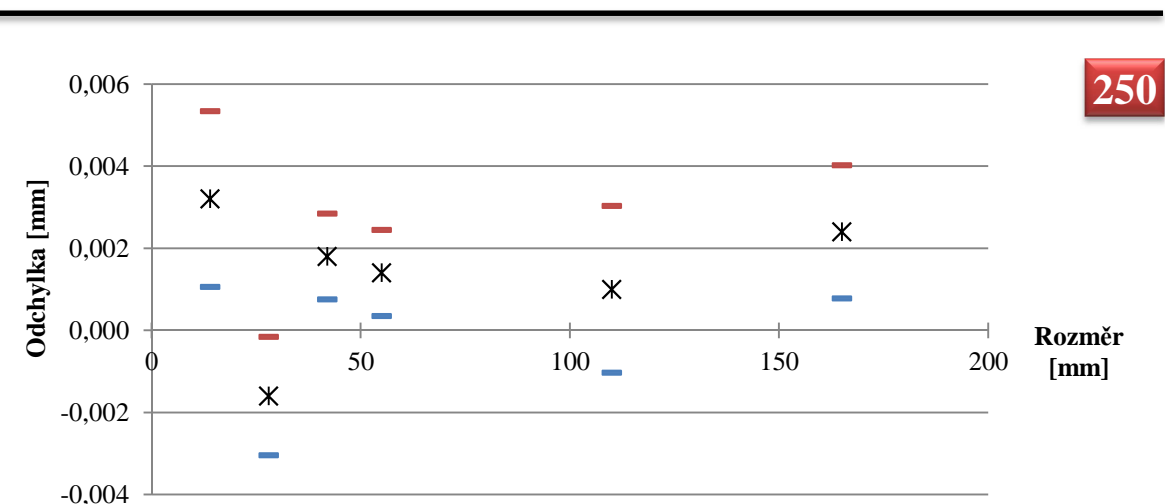
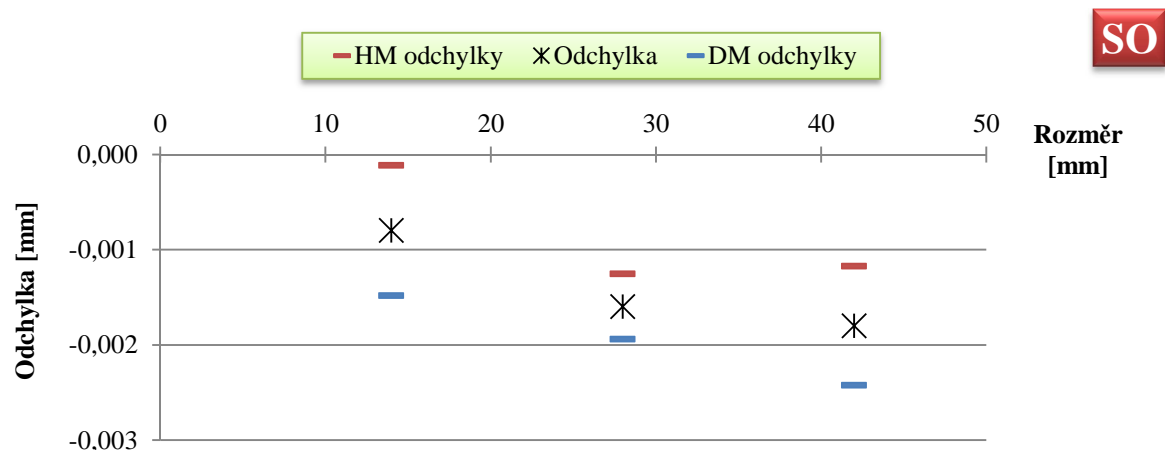
V následujícím textu jsou užívány výrazy, jež by mohly být chápány jinak, než autor zamýšlel. Z tohoto důvodu jsou zde upřesněny.

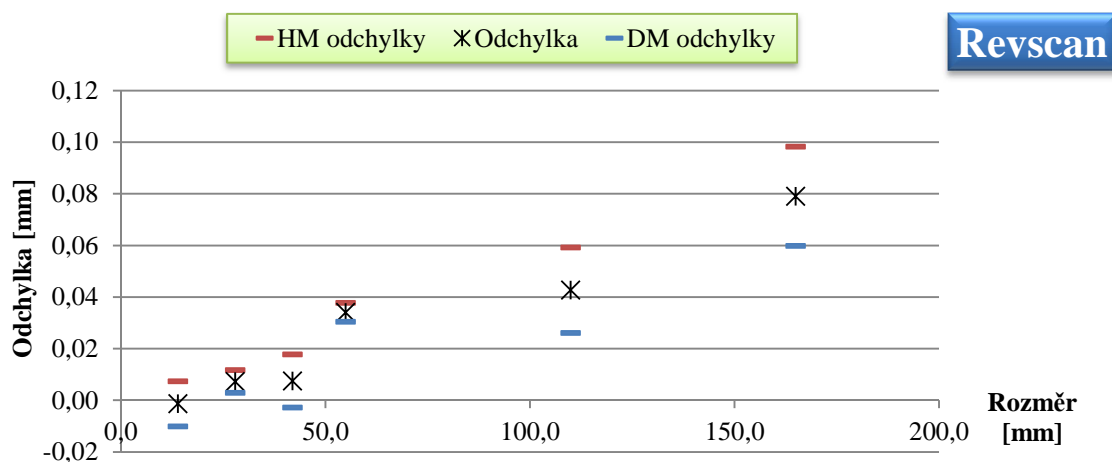
- **Nominální rozměr** - hodnota aritmetického průměru spočteného ze zjištěných velikostí rozměru při opakovaném měření na SMS.
- **Skenovaný rozměr** - hodnota aritmetického průměru spočteného ze zjištěných velikostí rozměru při opakovaném skenování (měření).
- **Odchylka, chyba** - rozdíl hodnoty skenovaného a nominálního rozměru.

Díličí výsledky inspekce naskenovaných dat jsou v této kapitole zpracovány do grafů. Každý graf je sestaven pro skupinu identických prvků měnícího se rozměru, kdy je pro všechny sledované rozměry vyznačena odchylka skenovaného rozměru od nominálního rozměru. Dále jsou zde vyznačeny horní (HM) a dolní mez (DM) intervalu této odchylky. Ty vznikly odečtením nominálního rozměru od možné maximální a minimální velikosti naskenovaného rozměru, které byly určeny ze standartní nejistoty měření typu A. Toto grafické zobrazení umožňuje identifikovat trend odchylky pro měnící se rozměry. Z uvedených mezí je možné odhadnout opakovatelnost měření rozměrů skenery. V softwaru skeneru byly odečítány naměřené hodnoty v řádech tisícín milimetru, které se dále zpracovaly výše popsáním způsobem. Aritmetický průměr byl tak ve tvaru čtyřmístného desetinného čísla, stejně jako průměr z hodnot naměřených na SMS. Hodnoty odchylek v tomto řádu byly uvažovány pouze pro názornější zobrazení trendu růstu odchylky v grafech. Pro konečné výsledky byly velikosti odchylek zaokrouhleny do řádu setin milimetru, ve kterém se již dají objektivně porovnávat.

7.7.1 Výsledky měření roztečí kulových prvků

Jak již bylo uvedeno, na rozměrech roztečí by měly být výsledky nejpřesnější, jelikož se neměřila vzdálenost dvou rovin, ale teoretických bodů (středů proložených koulí). V tomto případě by tedy na výsledky neměl mít výrazný vliv nedokonale naskenovaný povrch měřených objektů.



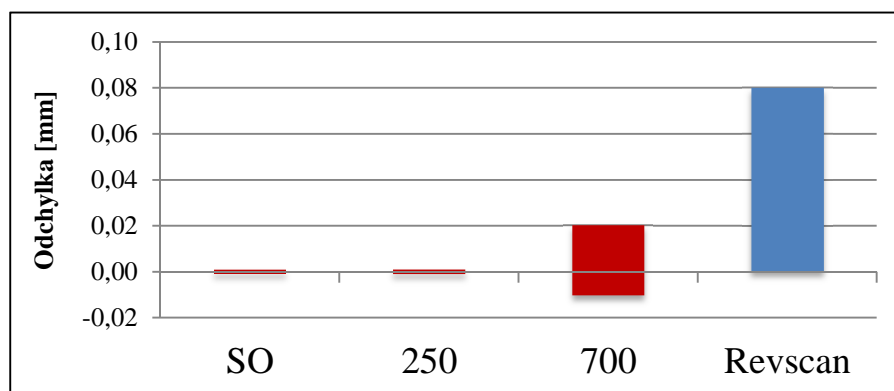


Graf 5: Rozteče kulových objektů

V posledních dvou grafech lze, až na malá vychýlení, zpozorovat náznak obdobného vývoje chyby v závislosti na rostoucím rozměru.

Velikost odchylek je u prvních dvou objektivů velmi malá. Jejich hodnota se drží pod 0,01 mm. Objektivem 700 se změřily rozměry, jejichž největší odchylka dosahuje k 0,02 mm. Nejvyšší rozdíl skenovaných a nominálních rozměrů byl vyhodnocen na výsledcích zařízení RevScan, kde se pohybuje na hranici 0,08 mm. Interval odchylky podává informaci o opakovatelnosti měření. Ta byla velice dobrá pro celou skupinu rozměrů u všech tří objektivů digitizéru ATOS. Skener RevScan měl dobrou opakovatelnost (již v setinách mm) s výjimkou dvou největších rozměrů, kde se interval navyšoval na několik setin mm.

V následujícím grafu jsou zobrazeny souhrnné výsledky pro oba skenery. Pro každé zařízení, resp. objektiv, je v grafu vynesena oblast ohraničená maximální a minimální velikostí odchylky, která byla zjištěna z odchylek všech rozměrů roztečí. Měření roztečí s téměř žádnou odchylkou umožnily objektivy SO a 250. Oblast chyby skeneru RevScan je poté téměř třikrát vyšší než pro objektiv 700.

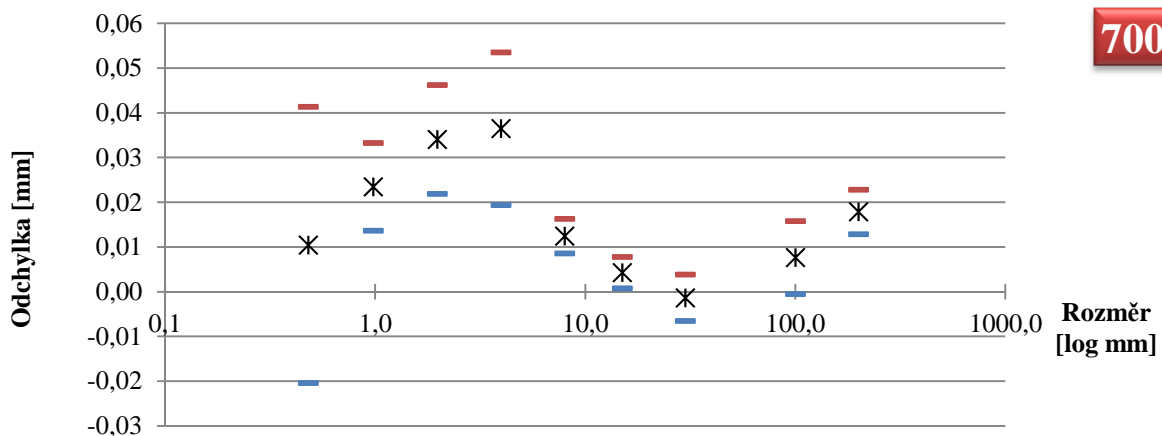
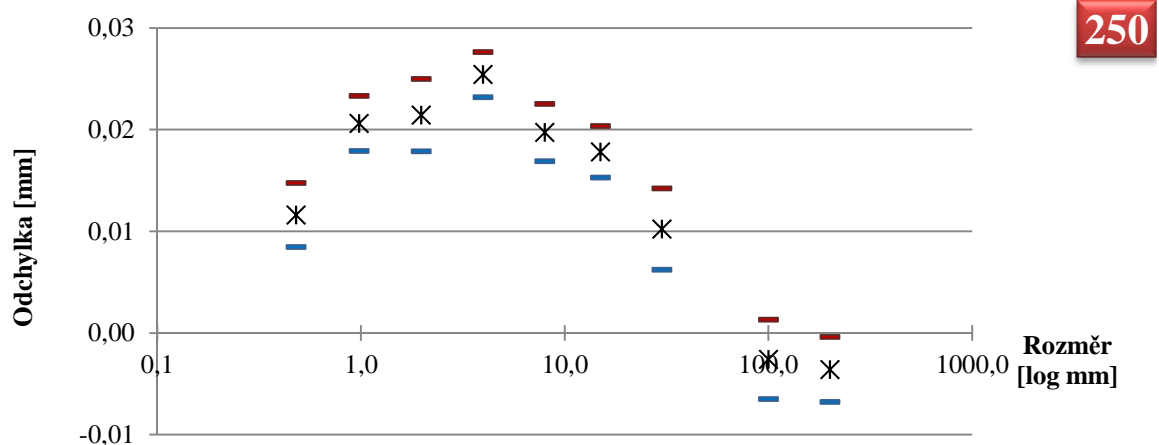
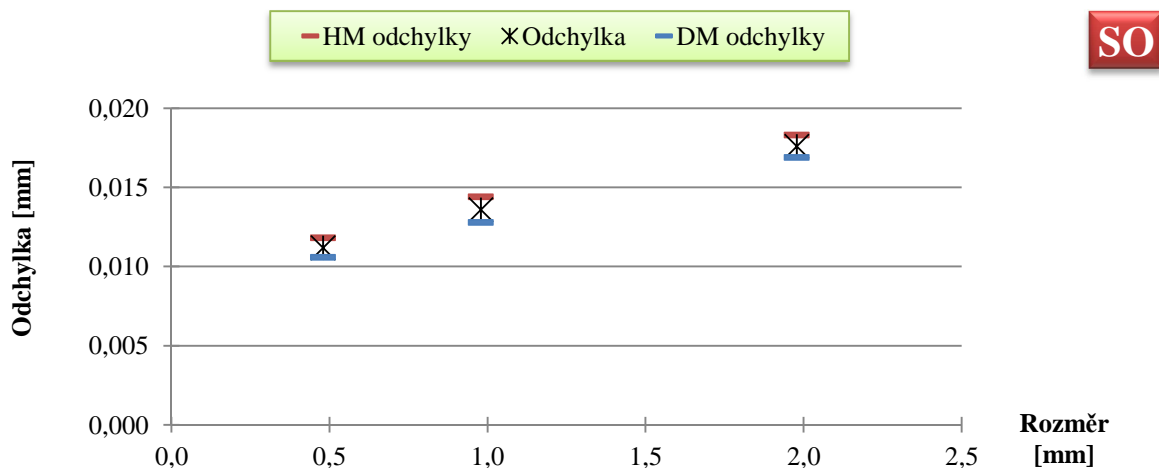


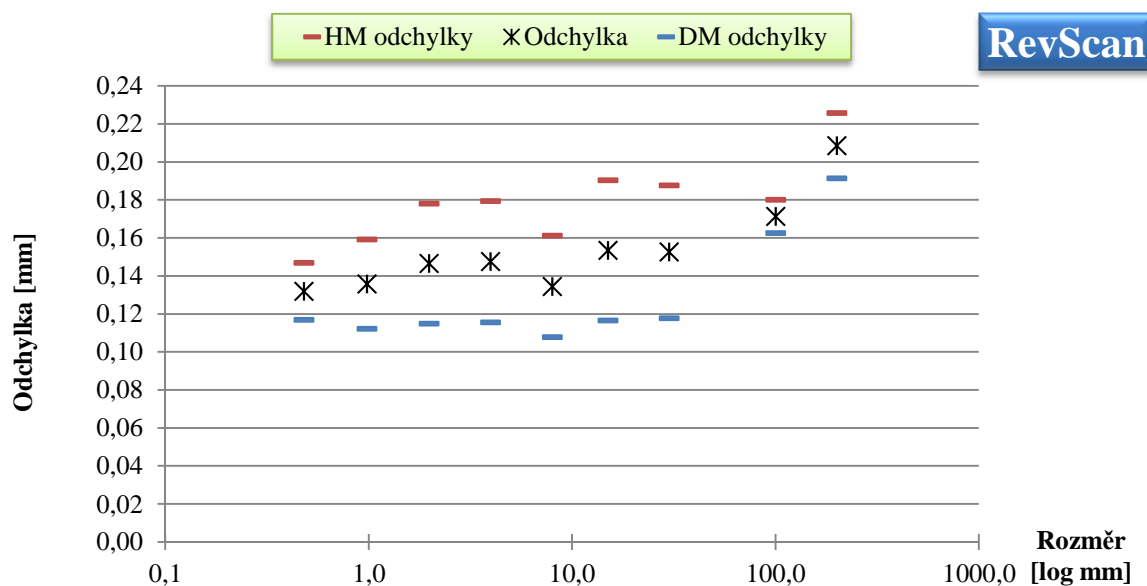
Graf 6: Souhrnné výsledky měření roztečí kulových prvků ²

² Výsledky objektivu SO jsou získány z nižšího počtu měřených rozměrů oproti ostatním zástupcům.

7.7.2 Výsledky měření délkových rozměrů

Délkové rozměry byly na rozdíl od roztečí měřeny mezi dvěma teoreticky rovnoběžnými rovinami. Dle předpokladu, jenž plynul z možné horší kvality povrchu naskenovaných ploch, zde měly být výstupy horší než v případě roztečí. Výsledky objektivů 250, 700 a skeneru RevScan jsou pro větší přehlednost zobrazeny na logaritmické stupnici. Poslední měřené hodnoty se totiž řádově liší od těch předchozích.



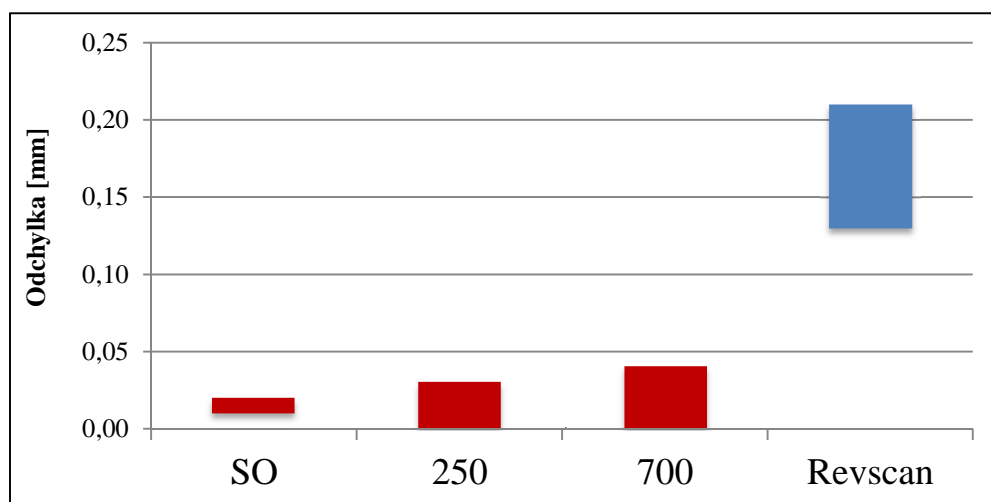


Graf 7: Délkové rozměry

Podobně jako v případě roztečí prvků lze na grafech sledovat podobný trend změny velikosti odchylky s rostoucím rozměrem, jenž lehce připomíná sinusový průběh. Pro objektivy skeneru ATOS odchylka zpočátku narůstá do hodnoty rozměru 4 mm. Dále následuje pokles k přesnějším hodnotám. Průběh grafu zařízení RevScan připomíná předchozí trojici první polovinou svého průběhu, avšak v druhé půli má tendenci rostoucí. Celkově je pak plošší.

Objektivy SO a 250 naměřily dané rozměry opět s velmi dobrou opakovatelností. Pro objektiv 700 lze říci, že jeho opakovatelnost měření je horší zejména pro malé rozměry, ovšem s jejich rostoucí velikostí je příznivější. Tato vlastnost byla též na horší úrovni u posledního zástupce z použitých zařízení. Největší odchylky objektivu SO byly opět relativně nízké, a to do hodnoty 0,02 mm. Vzájemně podobné výsledky byly naměřeny objektivy 250 a 700. Maximální rozdíl skenovaného a nominálního rozměru dosahoval pro objektiv 250 velikosti 0,03 mm a pro objektiv 700 o setinu více. Menšími odchylnkami se u těchto dvou objektivů vyznačují větší délkové rozměry, které se přibližují k délkám jejich měřících objemů. Největší odchylka byla opět zjištěna u zařízení RevScan a vyšplhala se až na velikost 0,21 mm na největším sledovaném rozměru. Odchylky nejmenších rozměrů nemusí být u skeneru RevScan zcela objektivní, jelikož povrchy ploch, mezi kterými se vzdálenost měřila, byly v některých případech neúplné (viz kapitola 7.6.1). Z konečných výsledků byly vyřazeny.

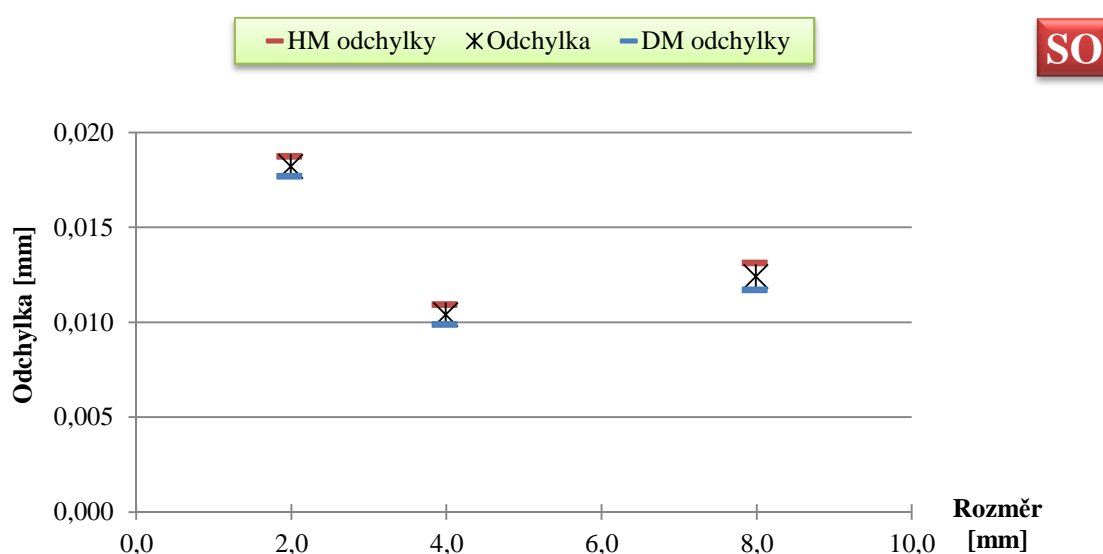
Na souhrnném grafu je vidět, že nejlépe měřil objektiv určený k snímání detailních prvků. V pořadí od nejnižší maximální odchylky jsou dále objektivy 250, 700 a RevScan s nejhorším výsledkem ze zkoumané množiny.



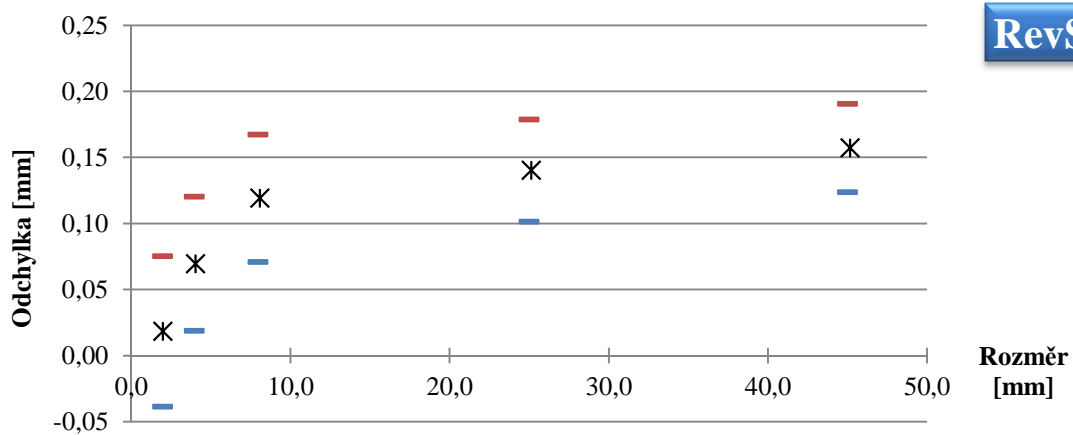
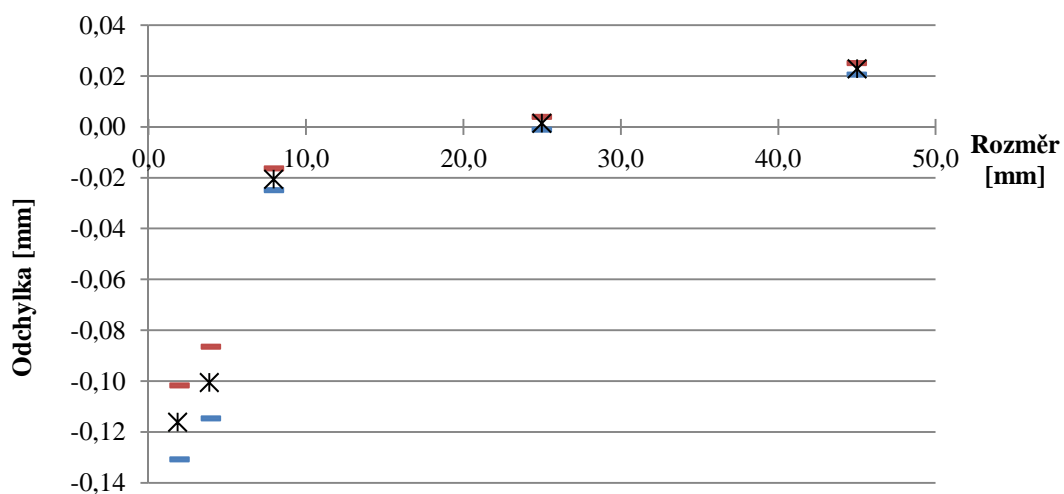
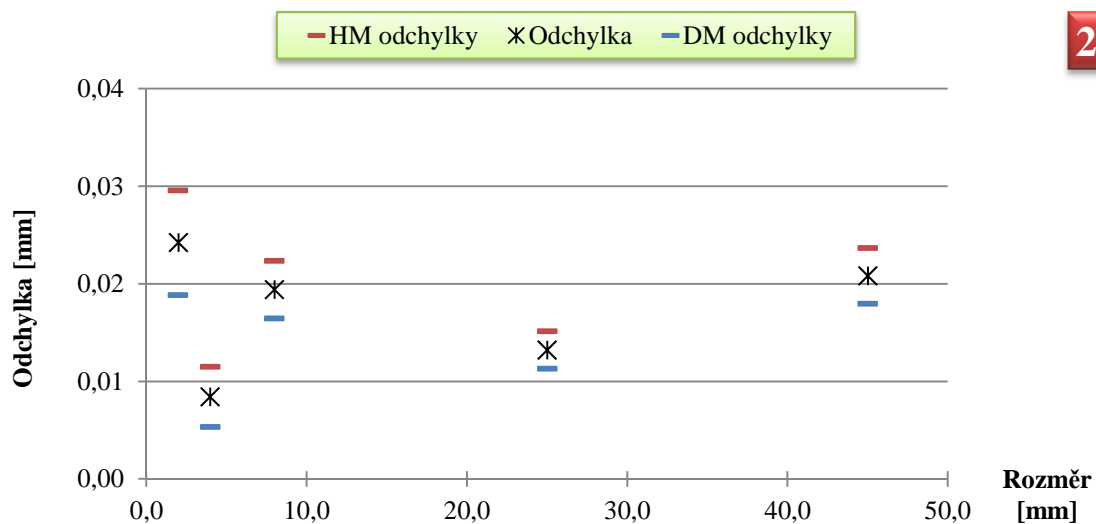
Graf 8: Souhrnné výsledky měření délkových rozměrů ³

7.7.3 Výsledky měření průměrů válců

Analýza přesnosti byla pro rotační objekty nejprve uskutečněna na skupině válců. Předmětem porovnání se tedy staly jejich průměry.



³ Výsledky objektivu SO jsou získány z nižšího počtu měřených rozměrů oproti ostatním zástupcům.



Graf 9: Průměry válců

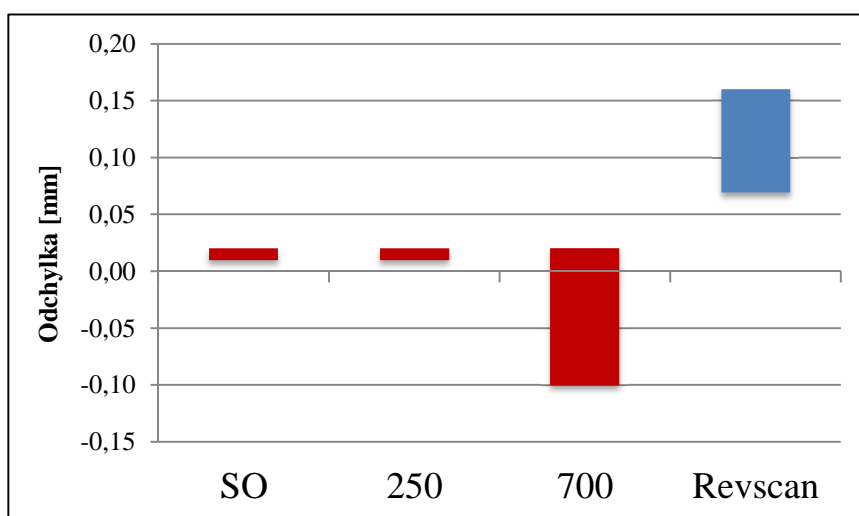
Průběh růstu odchylky při měření válců již nevypadá tak jednoznačně, jako byl v případě délkových rozměrů. U prvních dvou objektivů se její velikost mění zcela náhodně. Na druhou stranu, výsledky objektivu 700 a skeneru RevScan se vyznačují

velmi podobným rostoucím trendem. Přičemž hodnoty odchylek objektivu 700 se pohybují ze záporných velikostí do kladných, kde se téměř v celém průběhu odchylka zmenšuje. U zařízení RevScan naopak odchylka v celém průběhu roste v oblasti kladné poloroviny, resp. větších rozměrů skenovaných dat vůči nominálním.

Při práci s objektivy SO a 250 byla opakovatelnost měření opět velice dobrá. U největšího objektivu skeneru ATOS byla opakovatelnost obdobná kromě nejmenších rozměrů válců. Tyto válce o velmi malém rozměru se totiž nepodařilo kompletně naskenovat v celé své výšce, což může mít za následek větší odchylku rozměru a výraznější změnu mezi opakovanými měřeními. Opakovatelnost RevScanu je u měření průměrů válců špatná a výrazně se nemění s rostoucím rozměrem válce.

Největší hodnota odchylky pro SO byla změřena opět s velikostí 0,02 mm. Objektiv s označením 250 měl tuto odchylku na stejné úrovni. V kapitole 7.6.3 bylo zjištěno, že válec průměru 2 mm byl zachycen objektivem 700 a skenerem RevScan pouze částečně. Proto velikosti jejich odchylek nemusí být objektivní a byly vypuštěny z celkových výsledků. Největší uvažovaná odchylka měření objektivu 700 tak směřovala do záporných hodnot k velikosti - 0,10 mm. Nejméně přesně měřil opět skener RevScan s maximální odchylkou kolem 0,16 mm.

Průměry válců se tedy nejpřesněji měřily skenerem ATOS s objektivy systému SO a 250. Objektiv 700 naměřil převážně rozměry menší, než jsou ve skutečnosti, a jejich rozdílnost od nominálních rozměrů umísťuje objektiv opět na třetí místo v konečném přehledu. Skener RevScan se zdá být i pro měření průměrů válců nejméně přesným zařízením z celé skupiny.

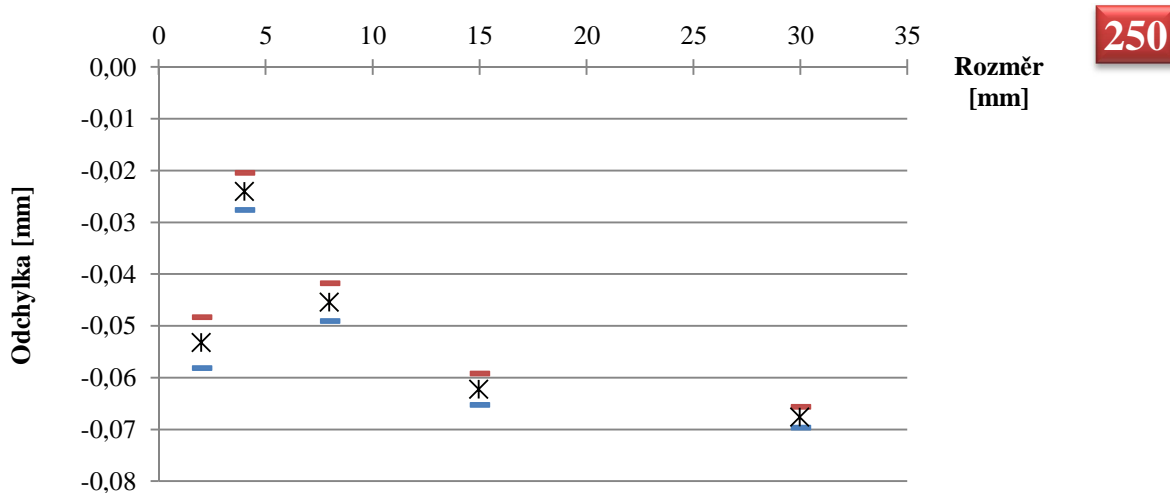
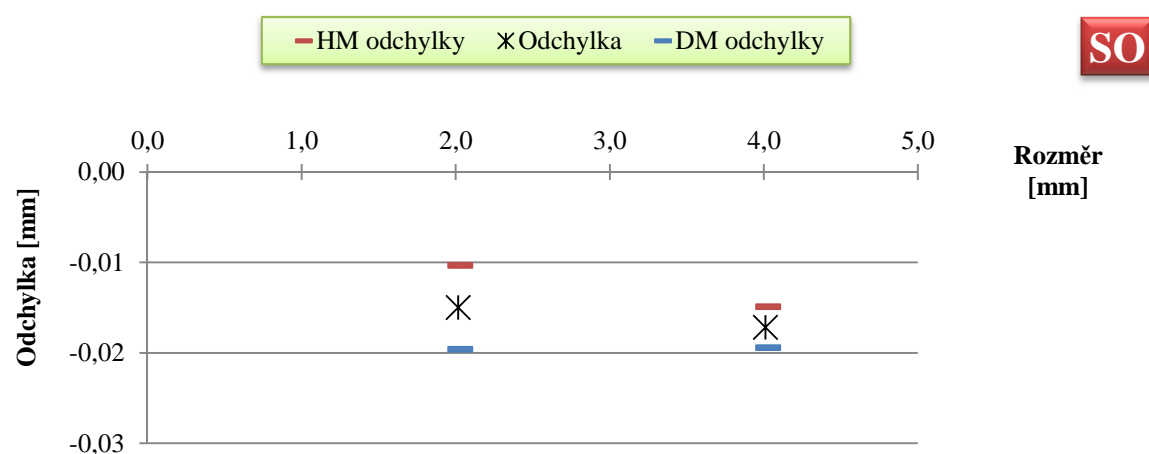


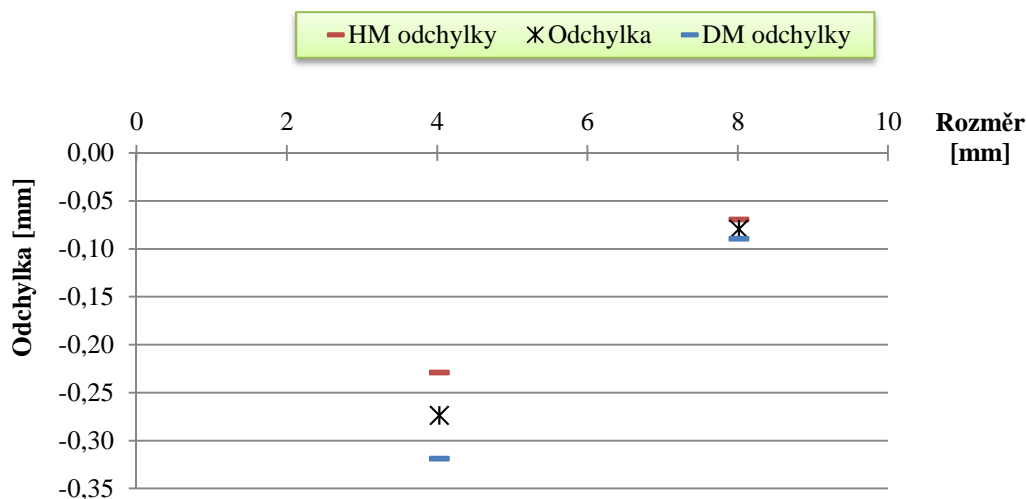
Graf 10: Souhrnné výsledky měření průměrů válců ⁴

⁴ Výsledky objektivu SO jsou získány z nižšího počtu měřených rozměrů oproti ostatním zástupcům.

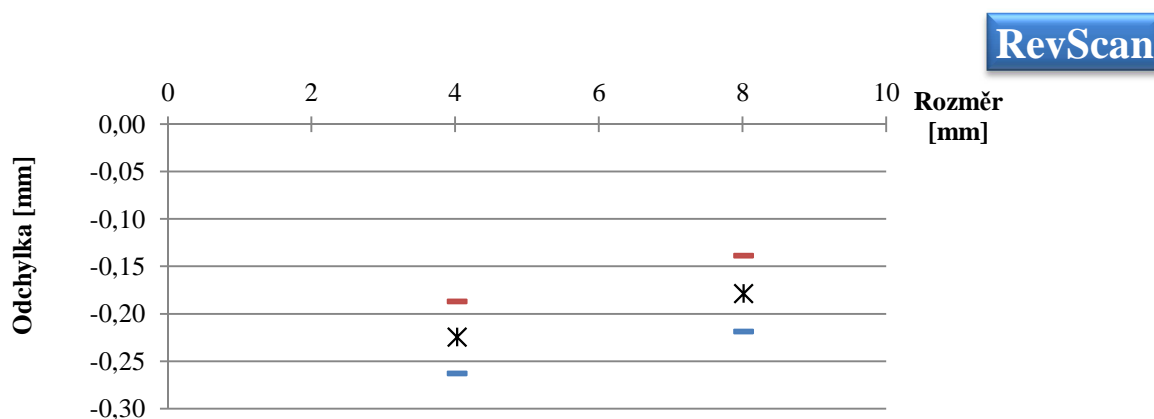
7.7.4 Výsledky měření průměrů otvorů

Skenování vnitřní geometrie bývá u optických skenerů vždy velkým problémem. Tento fakt byl potvrzen i při skenování v této diplomové práci. Skupinu pěti různých průměrů otvorů se podařilo měřitelně naskenovat pouze objektivem 250, pro který byl etalon původně navrhován. Objektivem SO se měřily pouze nejmenší rozměry (2 a 4 mm) a i v tomto případě se podařilo zachytit dostatečnou plochu otvorů k jejich změření. Ovšem na skenech z objektivu 700 skeneru ATOS a ze skeneru RevScan bylo umožněno změřit pouze rozměry otvorů velikostí 4 a 8 mm. Otvory s největšími průměry sice byly naskenovány, ale malé rozlišení snímání způsobilo na jejich nízkých hloubkách deformaci válcové plochy. Nebylo tedy možné těmito plochami proložit ideální váleček nutný k jejich změření. Výsledky v následujících grafech u většiny zástupců neposkytují informaci o trendu změny chyby s rozměrem. Závěrečné výsledky jsou uvedeny pouze pro objektiv SO a 250, u nichž byla zachycena většina sledovaných rozměrů.





700

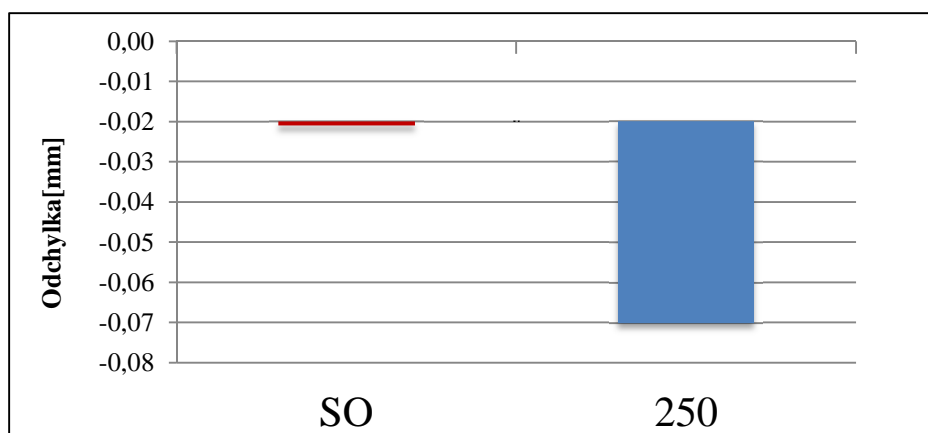


RevScan

Graf 11: Průměry otvorů

Trend vývoje chyby s rostoucím rozměrem lze objektivně vyhodnotit jen pro objektiv 250, jehož průběh se nechová tak, jak by se mohlo předpokládat. Z grafu je patrné, že odchylka roste s větším průměrem otvoru, tedy s výjimkou nejmenšího rozměru. Její průběh se jeví jako průběh části hyperboly. Opakovatelnost měření se ve většině případů zlepšuje s větším rozměrem otvoru.

Grafické znázornění výsledků měření objektivu SO umísťuje maximální odchylku opět pod absolutní hodnotou 0,02 mm. Průměry otvorů nasnímané objektivem 250 se vyznačují největší odchylkou - 0,07 mm. Velikosti odchylek u objektivu 700 a skeneru RevScan je nutno brát s rezervou, jelikož se u otvoru průměru 4 mm nepodařilo naskenovat kompletní válcovou plochu otvoru po jejím obvodu, či byla zdeformovaná (podobně jako u průměru 2 mm v případě měření objektivem 250, viz kapitola 7.6.4). Maximální odchylka bez tohoto otvoru měla pro objektiv 700 velikost až k - 0,08 mm a pro skener RevScan - 0,18 mm.



Graf 12: Souhrnné výsledky měření průměrů otvorů ⁵

7.7.5 Shrnutí výsledků rozměrové inspekce

Nejprve je nutno připomenout, že na velikost odchylek může mít nepatrný vliv vrstva zmatňujícího nástřiku. Například snímáním otvorů byly naměřeny hodnoty s odchylkami pohybujícími se v záporných číslech. To znamená, že se změřily menší hodnoty rozměrů, než ve skutečnosti jsou. Tento fakt může být umocněn právě přítomností zmatňujícího nástřiku na povrchu etalonu. Právě tak se odchylky rozměrů vnější geometrie ve většině případů vyskytovaly naopak v kladných hodnotách. Avšak jak bylo uvedeno v úvodu analýzy, výsledky ovlivněné vrstvou nástřiku jsou pro využití v praxi přínosnější.

Z výsledků rozměrové inspekce je víceméně možné objektivně ohodnotit jednotlivá zařízení. Celkově s nejnižšími odchylkami rozměrů na všech analyzovaných skupinách měřil objektiv SO optického skeneru ATOS II. Musí se ovšem zmínit, že měření s tímto objektivem bylo uskutečněno pouze na části souboru prvků, jenž byl snímán ostatními zařízeními. Konkrétně na prvcích s velmi malými rozměry, pro které je tento objektiv určen. Nicméně lze konstatovat, že přesnost snímání představovaná největší odchylkou nominálního a skenovaného rozměru je pro SO 0,02 mm. Objektiv se středním měřícím objemem (250) skeneru ATOS, jenž je jedním z nejpoužívanějších na katedře výrobních systémů, dosáhl také relativně dobrých výsledků. Snímání vnější geometrie objektiv „zvládl“ do velikosti odchylky 0,03 mm. O něco hůře pak dopadlo skenování vnitřní geometrie, kde se maximální odchylka ještě o něco navýšila, a to

⁵ Výsledky objektivu SO jsou získány z nižšího počtu měřených rozměrů oproti ostatním zástupcům.

k hodnotě - 0,07 mm. Uváží-li se jistá míra univerzálnosti objektivu, je tato hodnota přijatelná. Objektivy SO a 250 se téměř vždy povedlo opakovaně naskenovat velice podobné hodnoty rozměru. Opakovatelnost měření je tedy velmi dobrá a není tak při inspekčních úlohách nutné měření několikrát opakovat za účelem získání jistoty dosažených výsledků. U posledního zástupce skeneru ATOS II, objektivu 700, se musí vzít v potaz fakt, že primární využití jeho velkého měřicího objemu leží v oblasti měření spíše rozměrných a málo detailních objektů. Největší problém tedy nastal při skenování malých objektů. Jak se zdá, přesněji se nasnímalý spíše délkové rozměry než rozměry rotačních objektů. Délkové rozměry byly naskenovány s odchylkou do 0,04 mm a průměry válců do - 0,1 mm. Jelikož byl etalon původně navržen pro snímání objektivem 250, dalo se přepokládat, že tento fakt negativně ovlivní výsledky objektivu s větším měřicím objemem. Na prvcích s většími plochami by dosáhl jistě výsledků lepších. Opakovatelnost měření zde dosahuje o něco nižší úrovně a při inspekčních účelech je tedy žádoucí provedení více měření.

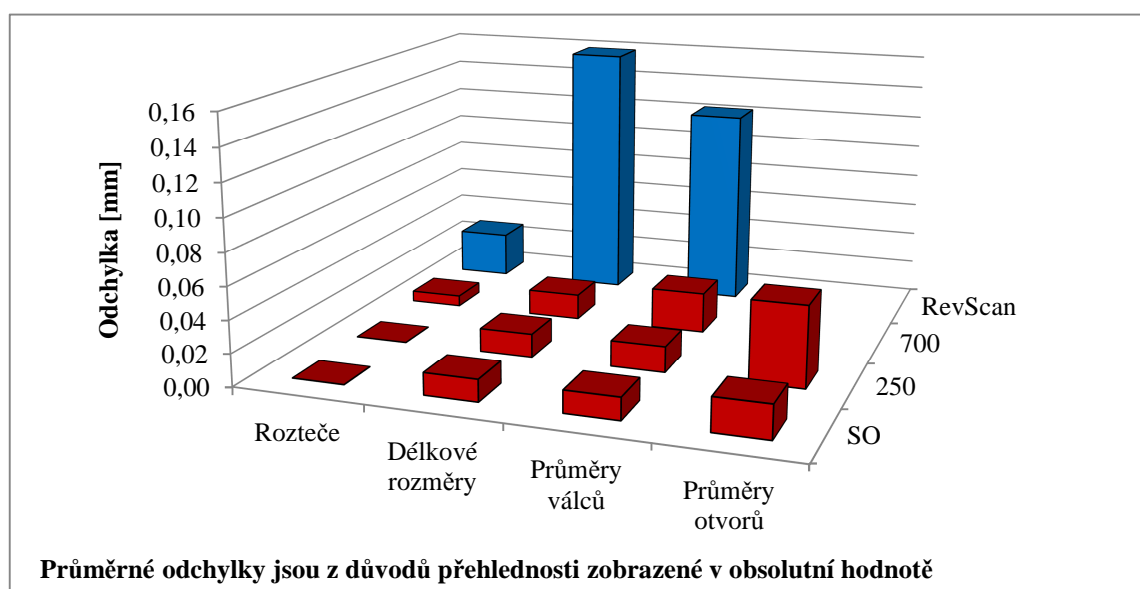
Analyzovaná přesnost snímání skeneru RevScan byla v celkovém porovnání se všemi použitými objektivy digitizéru ATOS II horší. Již v případě měření roztečí, kde skener ATOS dosahoval nejlepších výsledků, měřil RevScan s maximální odchylkou 0,08 mm. To je čtyřikrát krát hůře než objektiv 700 a v porovnání s SO a 250 je velikost odchylky již téměř o řád vyšší. Naměřené délkové rozměry se naskenovaly s největším odchýlením od nominálních hodnot o velikosti 0,21 mm, přičemž s výsledkem do 0,16 mm naměřil průměry válců. Opakovatelnost měření u tohoto zařízení není též dobrá. Dosažené výsledky nepotvrzují vhodnost využití skeneru k inspekčním účelům. Skener je tímto vhodný spíše k získání digitálního modelu, např. v oblasti designu či architektury.

Výrobci u svých zařízení uvádějí přesnost, jež je zjišťována v laboratorních podmínkách na etalonech ideálních tvarů, a jistě analyzovanou odlišným způsobem, než bylo provedeno v této práci. Je tedy vhodné porovnat, jak se uváděné a zjištěné údaje liší. Přesnost snímání skeneru ATOS II s rostoucím rozměrem měřicího objemu klesá, ovšem pro použité objektivy se má pohybovat v setinách milimetrů. Skener RevScan má snímat s přesností 0,05 mm. Analýzou bylo zjištěno, že se dosažené výsledky skeneru ATOS uvedeným informacím přibližují. Odchyly se ve většině případů pohybovaly v řádu setin milimetru. Na druhou stranu, naměřená data skeneru RevScan umisťují rozdíly skenovaných a skutečných hodnot k velikostem přesahujícím desetinu milimetru, což je vyšší hodnota než je uvedena výrobcem.

V tabulce 3 jsou shrnuty průměrné hodnoty uvažovaných odchylek pro jednotlivé skupiny rozměrů. V přehledu jsou uvedeny výsledky snímání otvorů pouze pro objektiv SO a 250 z důvodů zmíněných v předchozí kapitole. I toto průměrné vyjádření odchylek sděluje podobné výsledky porovnání jako v případě srovnání maximálních odchylek. Z hlediska rozměrové přesnosti zůstává pořadí jednotlivých zařízení nezměněno.

Tab. 3: Výsledek rozměrové inspekce⁶

	SO	250	700	RevScan
Rozteče kulových prvků	0,00	0,00	0,01	0,03
Délkové rozměry	0,01	0,01	0,02	0,16
Průměry válců	0,01	0,02	-0,03	0,12
Průměry otvorů	-0,02	-0,05	X	X



Graf 13: Výsledek rozměrové inspekce

7.8 Vyhodnocení inspekce tvaru a směru naskenovaných dat

Stejným způsobem, jako byla provedena analýza rozměrové přesnosti digitalizace, se analyzovala přesnost tvaru a směru. Při plánování strategie této části analýzy se vycházelo z teorie geometrických tolerancí tvaru a orientace. Na SMS byly spolu s rozměry měřeny také některé tolerance, např. válcovitosti, kruhovitosti, kolmosti a další. Nicméně se nesledovalo, zda změřený údaj leží v tolerančním poli,

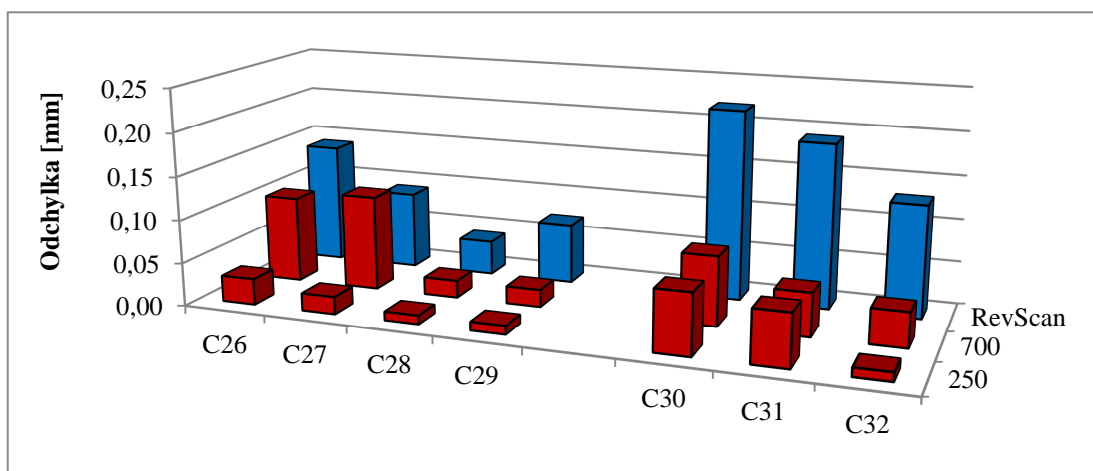
⁶ Hodnoty v tabulce jsou uvedeny v milimetrech.

ale pouze jeho hodnota udávající maximální rozdílnost tvaru od jeho dokonalého obrazu. Po opakovaném měření se zjištěné údaje zpracovaly stejným způsobem, jako v případě rozměrových hodnot. Střední hodnota poté sloužila k porovnání se střední hodnotou z inspekce naskenovaných dat. Tím byla získána odchylka naskenovaných a nominálních dat. Analýza přesnosti tvaru a směru byla vyhodnocena pro skener RevScan a pro objektivy 250 a 700 skeneru ATOS II. Objektiv SO byl vynechán, jelikož byl využit pro snímání detailních prvků a většina posuzovaných atribut se na těchto prvcích nevyskytovala.

Z principu použitých metod měření se dalo přepokládat, že výsledky skenovaných dat budou zatížené větší odchylkou od hodnot změřených na SMS. Odchýlení od ideálního tvaru či směru je v případě skenerů určováno z rozsáhlejší množiny bodů než u SMS. Mohly tak být zaznamenány větší velikosti odchýlení, které SMS na menším počtu bodů nezaregistroval.

Tab. 4: Výsledek inspekce tvaru a směru⁷

	Označení	250	700	RevScan
Odchýlení válcovitost válce Ø45	C26	0,03	0,10	0,14
Odchýlení válcovitost otvoru Ø8	C27	0,02	0,11	0,09
Odchýlení kruhovitost řezu na rohu etalonu	C28	0,01	0,02	0,04
Odchýlení rovinnost vrchní plochy kváдру	C29	0,01	0,02	0,07
Odchýlení rovnoběžnosti boků etalonu	C30	0,07	0,08	0,22
Odchýlení kolmosti boků etalonu	C31	0,06	0,05	0,19
Odchýlení sklonu úhlu 135°	C32	0,01	0,04	0,13



Graf 14: Výsledek inspekce tvaru a směru

⁷ Hodnoty v tabulce jsou uvedeny v milimetrech.

Z celkových výsledků vyšlo najevo, že se skeneru ATOS podařilo nejméně přesně zachytit tvar válcových ploch a směr dvou rovnoběžných a kolmých ploch. Celkově nejpriznivějšími výsledky, tj. s nejmenší odchylkou skenovaných a nominálních dat, vyniká skener ATOS II za použití objektivu 250. V tomto případě se velikosti odchylek pohybovaly do hodnoty 0,07 mm. Objektiv 700 již tak jednoznačné výsledky neměl a velikosti některých odchylek byly vysoké, a to až do 0,11 mm. Tím je myšlen případ válcových ploch. V tomto případě je však nejspíše na vině relativně malý rozměr prvků vůči rozměru měřicího objemu tohoto objektivu. Velice podobných výsledků však dosáhl skener RevScan, jehož měřicí objem měl podobné rozměry jako objektiv 250. Největší odchylka byla zaznamenána při měření rovnoběžnosti ploch na hodnotě 0,22 mm. Dále měl skener problém přesně zachytit směr dvou vzájemně kolmých ploch.

8 ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo uskutečnění a vyhodnocení analýzy přesnosti digitalizace s využitím optických skenerů ATOS II a RevScan. K splnění cíle byl navrhnout etalon, na kterém se stanovily nominální rozměry změřením na souřadnicovém měřicím stroji. Následné procesy digitalizace byly uskutečněny na základě zkušeností k získání co možná nejkomplexnějších digitálních modelů skenovaného etalonu.

Cíle diplomové práce byly splněny, jelikož u digitalizovaných etalonů proběhlo nejprve zjištění sledovaných rozměrů pomocí inspekčních funkcí softwaru GOM Inspect. Dále byly určeny odchylky skenovaných a nominálních rozměrů, jež vyjadřovaly míru přesnosti digitalizace provedené daným skenerem. Zjištěné hodnoty byly zpracovány do přehledných grafických vyjádření, ze kterých je možno stanovit velikosti odchylek pro několik typů odstupňovaných rozměrových údajů. Součástí analýzy bylo též určení odchylek tvaru a směru některých prvků etalonu. Práce odpovídá i na otázku hledající limity schopností skenerů zachytit detailní prvky.

Tato práce by měla sloužit jako pomůcka při digitalizaci prováděné v běžné praxi. Jejím účelem je poskytnout informace o možných velikostech odchylek rozměrů při snímání některých základních prvků. Dosažené výsledky dávají představu o změně rozměrové chyby se změnou velikosti rozměru, což umožňuje odhadnout její velikost i pro neuvažované hodnoty. Dalším přínosem jsou jistě zobrazené intervaly odchylek sledovaných rozměrů, jež naznačují opakovatelnost měření použitých optických skenerů. Výstupy práce je vhodné použít také jako návod při volbě optického zařízení za účelem digitalizace detailních prvků. Pro stanovený interval rozměrů jsou zde na první pohled patrné informace o možnostech jejich skenování.

Větší využitelnosti by zjištěné informace mohly nabýt v případě doplnění o výsledky měření etalonů o větších rozměrech, na kterých by bylo možno důkladněji otestovat rozměrnější měřicí objemy. Dále by bylo vhodné analyzovat a otestovat, jaké materiály, či trvalé povrchové úpravy je možné použít při výrobě etalonu za účelem jeho skenování bez zmatňujícího nástřiku. Mohlo by tak dojít k přiblížení velikosti chyby, jakou vnáší do měření právě vrstva nástřiku.

Seznam použité literatury

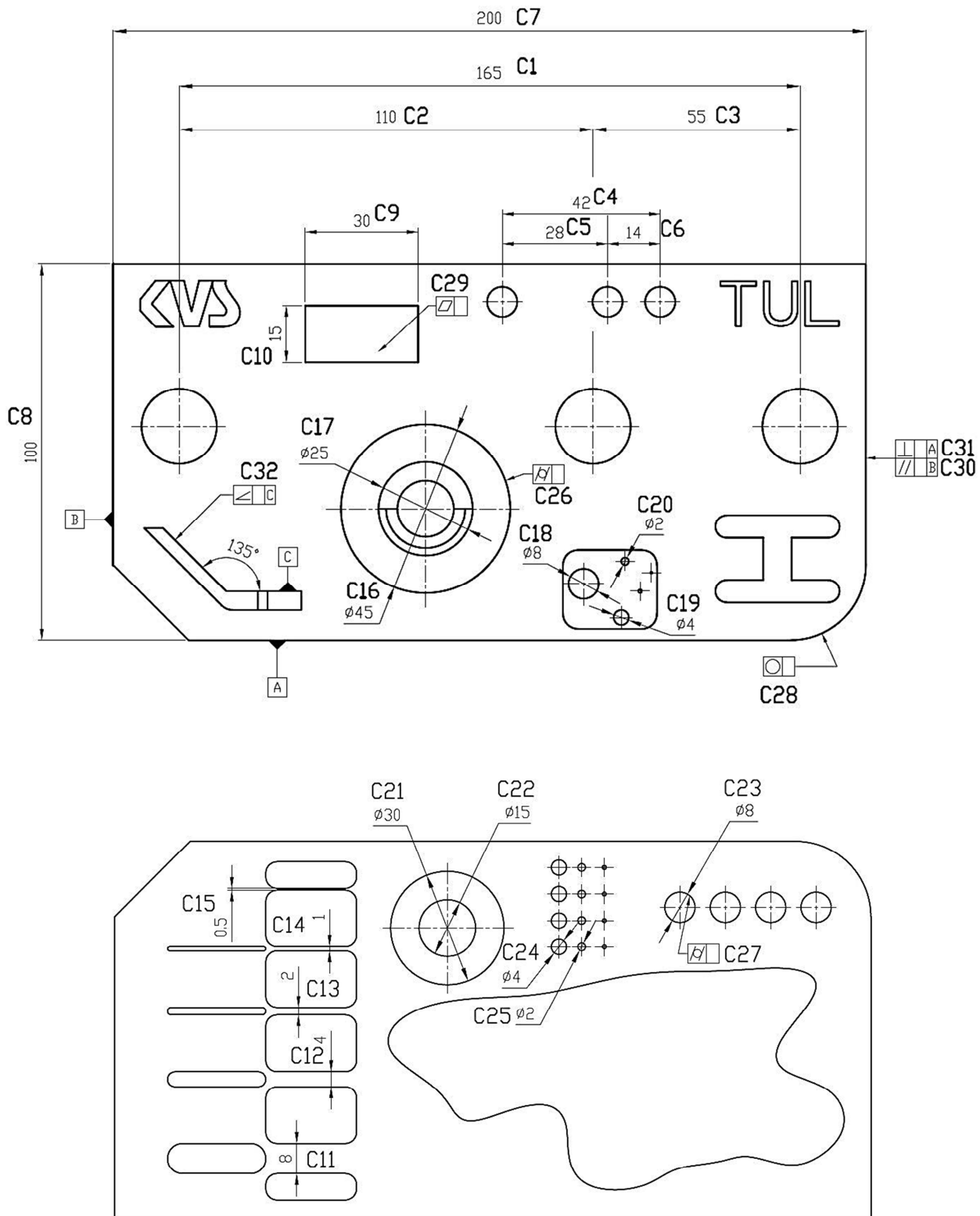
- [1] NAVRÁTIL, Robert. 3D skenery. *Reverse Engineering* [online]. 2000 [cit. 2013-02-26]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/index.html>
- [2] Reverse engineering. *Wikipedia* [online]. 2012 [cit. 2012-12-02]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Reverse_engineering
- [3] 3D skener. *KISK* [online]. 2011 [cit. 2012-11-24]. Dostupné z: http://kisk.phil.muni.cz/wiki/3D_skener
- [4] Rapid Prototyping (RP) & Reverse Engineering (RE). *Ústav Konstruování* [online]. 2006 [cit. 2012-11-24]. Dostupné z: <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/ZRI/RE.pdf>
- [5] 3D Digitalization at the Acropolis Museum in Athens. *IMA Solutions* [online]. 2012 [cit. 2013-02-24]. Dostupné z: <http://www.ima-solutions.fr/wp-content/uploads/img051-298x300.jpg>
- [6] Point cloud. *Wikipedia* [online]. 2012 [cit. 2012-11-24]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Point_cloud
- [7] KALOVÁ, Ilona a Karel HORÁK. Optické metody měření 3D objektů. *Elektrorevue* [online]. 2005 [cit. 2013-02-15]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>
- [8] MICHALISKO, Jan. *Využití 3D skenování pro přípravu obrábění odlitků součástí parních turbín*. Brno, 2012. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=55704. Diplomová práce. VUT Brno.
- [9] Optický skener ATOS. *MCAE: 3D digitální technologie* [online]. 2012 [cit. 2012-10-25]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/data/files/atos-final-25.pdf>
- [10] 3D optické skenování jako součást technologií rapid prototyping ve společnosti Evektor. *TECHNODAT* [online]. 2011 [cit. 2012-10-25]. Dostupné z: <http://www.technodat.cz/3d-opticke-skenovani-jako-soucast-technologie-rapid-prototyping-ve-spolecnosti-evektor>
- [11] ATOS. *MCAE Systems* [online]. 2012 [cit. 2013-02-08]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/atos>
- [12] 3D Skenery. *SolidVision* [online]. 2012 [cit. 2012-11-04]. Dostupné z: <http://www.solidvision.cz/download/pdf/handyscan.pdf>
- [13] ŠNAJDÁREK, Ladislav. *Metody 3D laserového skenování obrobku ve výrobním procesu* [online]. Brno, 2008 [cit. 2013-02-23]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6001. Bakalářská práce. VUT Brno.

- [14] 3D Scanners. *KONICA MINOLTA* [online]. 2013 [cit. 2013-02-23]. Dostupné z: http://sensing.konicaminolta.us/wp-content/uploads/2011/04/vivid9i_top.jpg
- [15] POKORNÝ, Přemysl. *Souřadnicové měřicí stroje*. Liberec: TUL, 1998. ISBN 80-7083-326-2.
- [16] MicroScribe. *Revware: Reshape Your World* [online]. 2012 [cit. 2012-11-10]. Dostupné z: http://www.revware.net/wp-content/uploads/2012/05/7_MicroScribe_G_Product_Brochure.pdf
- [17] LYSÝ, Zbyněk. *Management kalibrace souřadnicového měřicího stroje (SMS)*. Brno, 2012. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53766. Diplomová práce. VUT BRNO.
- [18] MACHÁČEK, Pavel. Nové možnosti měření na souřadnicových měřicích strojích. *FS ČVUT: Konference Studentské tvůrčí činnosti* [online]. 2008 [cit. 2013-02-16]. Dostupné z: http://stc.fs.cvut.cz/History/2008/Sbornik/DP/Machacek_Pavel_12134.pdf
- [19] CSS-3000 SYSTEM. *Capture Geometry Internally* [online]. 2012 [cit. 2013-02-04]. Dostupné z: <http://www.cgiinspection.com/UserFiles/Image/image002.jpg>
- [20] Chyby přímých měření. *Moodle server FP TUL: Fyzikální praktikum 1-3* [online]. 2012 [cit. 2013-03-04]. Dostupné z: https://moodle.fp.tul.cz/nano/pluginfile.php/341/mod_resource/content/2/Chyby%20přímých%20měření.pdf
- [21] Technická měření: Nejistoty měření. *FS ČVUT* [online]. 2011 [cit. 2013-02-17]. Dostupné z: <http://www1.fs.cvut.cz/cz/u12110/tem/nejistoty/nejistoty1.pdf>
- [22] Chyby měření – základní pojmy. *ČVUT: Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská* [online]. 2011 [cit. 2013-02-17]. Dostupné z: http://www.fjfi.cvut.cz/files/k402/pers_hpgs/skoda/prime_mereni1.pdf
- [23] Pravděpodobnostní rozdělení spojité náhodné veličiny pro základní soubory. *Veterinární a farmaceutická univerzita Brno* [online]. 2012 [cit. 2013-02-17]. Dostupné z: http://cit.vfu.cz/stat/fvl/teorie/predn2/rozdelZS_soubory/image002.jpg
- [24] JENČÍK, Josef a Jaromír VOLF. *Technická měření*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02138-6.
- [25] GOM Inspect. *MCAE Systems* [online]. 2013 [cit. 2013-03-20]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/gom-inspect-1307351536>
- [26] *Náповěda softwaru GOM Inspect V7 SR2*. 2011.
- [27] NAVRÁTIL, Robert. Reverse Engineering - trocha teorie. *Reverse Engineering* [online]. [cit. 2013-02-26]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/re-teorie/index.html>

Seznam příloh

Příloha I: Rozměrové schéma etalonu C.....	I
Příloha II: Naměřené hodnoty na SMS.....	II
Příloha III: Naměřené hodnoty na skenovaných datech (Objektiv SO, ATOS II)	III
Příloha IV: Naměřené hodnoty na skenovaných datech (Objektiv 250, ATOS II)	IV
Příloha V: Naměřené hodnoty na skenovaných datech (Objektiv 700, ATOS II)	V
Příloha VI: Naměřené hodnoty na skenovaných datech (RevScan).....	VI

Příloha I: Rozměrové schéma etalonu C



Příloha II: Naměřené hodnoty na SMS

Prvek	Ozn.	Rozměr CAD	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření	Rozměr SMS		
Rozteč 165 mm	C1	165,000	164,999	164,999	164,998	164,999	164,999	164,9988	±	0,0008
Rozteč 110 mm	C2	110,000	109,997	109,997	109,997	109,997	109,997	109,9970	±	0,0004
Rozteč 55 mm	C3	55,000	55,002	55,002	55,002	55,002	55,002	55,0020	±	0,0003
Rozteč 42 mm	C4	42,000	42,001	42,002	42,002	42,002	42,002	42,0018	±	0,0006
Rozteč 28 mm	C5	28,000	28,000	27,999	27,999	27,999	27,999	27,9992	±	0,0006
Rozteč 14 mm	C6	14,000	14,001	14,003	14,003	14,003	14,003	14,0026	±	0,0011
Délkový rozměr 200 mm	C7	200,000	200,129	200,128	200,127	200,127	200,128	200,1278	±	0,0012
Délkový rozměr 100 mm	C8	100,000	100,130	100,128	100,127	100,128	100,128	100,1282	±	0,0014
Délkový rozměr 30 mm	C9	30,000	30,007	30,007	30,006	30,006	30,006	30,0064	±	0,0007
Délkový rozměr 15 mm	C10	15,000	15,005	15,004	15,004	15,004	15,004	15,0042	±	0,0006
Délkový rozměr 8 mm	C11	8,000	7,977	7,977	7,978	7,977	7,977	7,9772	±	0,0006
Délkový rozměr 4 mm	C12	4,000	3,978	3,976	3,977	3,976	3,976	3,9766	±	0,0011
Délkový rozměr 2 mm	C13	2,000	1,979	1,980	1,979	1,978	1,979	1,9790	±	0,0009
Délkový rozměr 1 mm	C14	1,000	0,980	0,980	0,979	0,979	0,978	0,9792	±	0,0011
Délkový rozměr 0,5 mm	C15	0,500	0,481	0,481	0,481	0,481	0,480	0,4808	±	0,0006
Válec Ø45 mm	C16	45,000	45,004	45,003	45,002	45,002	45,002	45,0026	±	0,0012
Válec Ø25 mm	C17	25,000	25,000	25,000	24,999	24,999	24,999	24,9994	±	0,0007
Válec Ø8 mm	C18	8,000	7,977	7,976	7,976	7,976	7,976	7,9762	±	0,0006
Válec Ø4 mm	C19	4,000	3,977	3,977	3,976	3,976	3,976	3,9764	±	0,0007
Válec Ø2 mm	C20	2,000	1,974	1,974	1,974	1,974	1,974	1,9740	±	0,0002
Otvor Ø30 mm	C21	30,000	30,023	30,023	30,021	30,020	30,022	30,0218	±	0,0017
Otvor Ø15 mm	C22	15,000	15,014	15,014	15,015	15,014	15,015	15,0144	±	0,0007
Otvor Ø8 mm	C23	8,000	8,015	8,015	8,015	8,015	8,016	8,0152	±	0,0006
Otvor Ø4 mm	C24	4,000	4,029	4,030	4,029	4,029	4,030	4,0294	±	0,0007
Otvor Ø2 mm	C25	2,000	2,030	2,031	2,032	2,033	2,032	2,0316	±	0,0014
Odchýlení válcovitosti válce Ø45	C26	0,000	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004	0,0042	±	0,0006
Odchýlení válcovitosti otvoru Ø8	C27	0,000	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,0060	±	0,0002
Odchýlení kruhovitosti řezu na rohu etalonu	C28	0,000	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,0034	±	0,0007
Odchýlení rovinnosti vrchní plochy kvádry	C29	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0010	±	0,0002
Odchýlení rovnoběžnosti boků etalonu	C30	0,000	0,000	0,000	0,002	0,001	0,002	0,0010	±	0,0013
Odchýlení kolmosti boků etalonu	C31	0,000	0,007	0,006	0,005	0,007	0,005	0,0060	±	0,0013
Odchýlení sklonu úhlu 135°	C32	0,000	0,009	0,008	0,008	0,009	0,009	0,0086	±	0,0007

Hodnoty v tabulce jsou uvedeny v milimetrech.

Příloha III: Naměřené hodnoty na skenovaných datech (Objektiv SO, ATOS II)

Prvek	Ozn.	Rozměr SMS	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření	Rozměr SCAN		Odchylka
Rozteč 42 mm	C4	42,0018	42,001	41,999	41,999	42,000	42,001	42,0000	± 0,0006	0,00
Rozteč 28 mm	C5	27,9992	27,998	27,997	27,998	27,998	27,997	27,9976	± 0,0003	0,00
Rozteč 14 mm	C6	14,0026	14,002	14,002	14,003	14,002	14,000	14,0018	± 0,0007	0,00
Délkový rozměr 2 mm	C13	1,9790	1,996	1,997	1,997	1,998	1,995	1,9966	± 0,0007	0,02
Délkový rozměr 1 mm	C14	0,9792	0,994	0,994	0,993	0,992	0,991	0,9928	± 0,0008	0,01
Délkový rozměr 0,5 mm	C15	0,4808	0,491	0,492	0,493	0,493	0,491	0,4920	± 0,0006	0,01
Válec Ø8 mm	C18	7,9762	7,989	7,988	7,989	7,990	7,987	7,9886	± 0,0007	0,01
Válec Ø4 mm	C19	3,9764	3,987	3,988	3,987	3,986	3,986	3,9868	± 0,0005	0,01
Válec Ø2 mm	C20	1,9740	1,992	1,993	1,992	1,993	1,991	1,9922	± 0,0005	0,02
Otvor Ø4 mm	C24	4,0294	4,008	4,016	4,010	4,016	4,011	4,0122	± 0,0023	-0,02
Otvor Ø2 mm	C25	2,0316	2,010	2,025	2,014	2,024	2,010	2,0166	± 0,0046	-0,02

Hodnoty v tabulce jsou uvedeny v milimetrech.

Příloha IV: Naměřené hodnoty na skenovaných datech (Objektiv 250, ATOS II)

Prvek	Ozn.	Rozměr SMS	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření	Rozměr SCAN	Odchylka
Rozteč 165 mm	C1	164,9988	165,000	165,005	165,001	165,002	164,998	165,0012 ± 0,0016	0,00
Rozteč 110 mm	C2	109,9970	109,998	109,994	109,997	109,998	110,002	109,9978 ± 0,0018	0,00
Rozteč 55 mm	C3	55,0020	55,002	55,003	55,002	55,004	55,006	55,0034 ± 0,0010	0,00
Rozteč 42 mm	C4	42,0018	42,005	42,001	42,004	42,003	42,005	42,0036 ± 0,0010	0,00
Rozteč 28 mm	C5	27,9992	27,997	27,994	27,999	27,998	28,000	27,9976 ± 0,0014	0,00
Rozteč 14 mm	C6	14,0026	14,007	14,011	14,002	14,005	14,004	14,0058 ± 0,0021	0,00
Délkový rozměr 200 mm	C7	200,1278	200,126	200,130	200,116	200,125	200,124	200,1242 ± 0,0032	0,00
Délkový rozměr 100 mm	C8	100,1282	100,126	100,115	100,131	100,127	100,129	100,1256 ± 0,0039	0,00
Délkový rozměr 30 mm	C9	30,0064	30,015	30,013	30,009	30,021	30,025	30,0166 ± 0,0040	0,01
Délkový rozměr 15 mm	C10	15,0042	15,024	15,022	15,016	15,021	15,027	15,0220 ± 0,0025	0,02
Délkový rozměr 8 mm	C11	7,9772	7,995	7,992	7,997	7,999	8,004	7,9969 ± 0,0028	0,02
Délkový rozměr 4 mm	C12	3,9766	4,004	3,997	4,000	4,003	4,006	4,0020 ± 0,0022	0,03
Délkový rozměr 2 mm	C13	1,9790	2,001	1,992	2,000	2,001	2,008	2,0004 ± 0,0036	0,02
Délkový rozměr 1 mm	C14	0,9792	0,999	1,007	0,996	1,000	0,997	0,9998 ± 0,0027	0,02
Délkový rozměr 0,5 mm	C15	0,4808	0,491	0,486	0,492	0,493	0,500	0,4924 ± 0,0031	0,01
Válec Ø45 mm	C16	45,0026	45,026	45,016	45,023	45,024	45,028	45,0234 ± 0,0029	0,02
Válec Ø25 mm	C17	24,9994	25,014	25,009	25,011	25,012	25,017	25,0126 ± 0,0019	0,01
Válec Ø8 mm	C18	7,9762	7,996	7,990	7,994	7,995	8,003	7,9956 ± 0,0030	0,02
Válec Ø4 mm	C19	3,9764	3,985	3,993	3,980	3,983	3,983	3,9848 ± 0,0031	0,01
Válec Ø2 mm	C20	1,9740	2,006	2,005	1,990	1,988	2,002	1,9982 ± 0,0054	0,02
Otvor Ø30 mm	C21	30,0218	29,956	29,952	29,958	29,955	29,950	29,9542 ± 0,0020	-0,07
Otvor Ø15 mm	C22	15,0144	14,954	14,952	14,959	14,950	14,946	14,9522 ± 0,0030	-0,06
Otvor Ø8 mm	C23	8,0152	7,972	7,969	7,978	7,968	7,962	7,9698 ± 0,0037	-0,05
Otvor Ø4 mm	C24	4,0294	4,008	3,997	4,009	4,002	4,011	4,0054 ± 0,0036	-0,02
Otvor Ø2 mm	C25	2,0316	1,986	1,972	1,979	1,969	1,986	1,9784 ± 0,0049	-0,05
Odchýlení válcovitosti válce Ø45	C26	0,0042	0,031	0,029	0,035	0,028	0,026	0,0298 ± 0,0021	0,03
Odchýlení válcovitosti otvoru Ø8	C27	0,0060	0,028	0,026	0,023	0,027	0,034	0,0276 ± 0,0025	0,02
Odchýlení kruhovitosti řezu na rohu etalonu	C28	0,0034	0,008	0,007	0,002	0,010	0,017	0,0088 ± 0,0034	0,01
Odchýlení rovinnosti vrchní plochy kvádra	C29	0,0010	0,009	0,014	0,010	0,011	0,006	0,0100 ± 0,0018	0,01
Odchýlení rovnoběžnosti boků etalonu	C30	0,0010	0,070	0,079	0,072	0,073	0,067	0,0722 ± 0,0028	0,07
Odchýlení kolmosti boků etalonu	C31	0,0060	0,065	0,062	0,057	0,059	0,069	0,0624 ± 0,0030	0,06
Odchýlení sklonu úhlu 135°	C32	0,0086	0,019	0,017	0,025	0,023	0,020	0,0208 ± 0,0020	0,01

Hodnoty v tabulce jsou uvedeny v milimetrech.

Příloha V: Naměřené hodnoty na skenovaných datech (Objektiv 700, ATOS II)

Prvek	Ozn.	Rozměr SMS	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření	Rozměr SCAN	Odchylka	
Rozteč 165 mm	C1	164,9988	165,017	165,011	165,016	165,026	165,021	165,0182	± 0,0035	0,02
Rozteč 110 mm	C2	109,9970	110,016	110,009	110,010	110,015	110,013	110,0126	± 0,0019	0,02
Rozteč 55 mm	C3	55,0020	55,001	55,002	55,005	55,011	55,009	55,0056	± 0,0027	0,00
Rozteč 42 mm	C4	42,0018	42,003	41,993	42,000	42,003	41,996	41,9990	± 0,0028	0,00
Rozteč 28 mm	C5	27,9992	27,994	27,990	27,994	27,992	27,998	27,9936	± 0,0019	-0,01
Rozteč 14 mm	C6	14,0026	14,008	14,004	14,007	14,011	14,011	14,0082	± 0,0018	0,01
Délkový rozměr 200 mm	C7	200,1278	200,143	200,153	200,149	200,133	200,150	200,1456	± 0,0050	0,02
Délkový rozměr 100 mm	C8	100,1282	100,148	100,147	100,139	100,118	100,127	100,1358	± 0,0082	0,01
Délkový rozměr 30 mm	C9	30,0064	30,002	30,013	30,008	29,992	30,010	30,0050	± 0,0052	0,00
Délkový rozměr 15 mm	C10	15,0042	15,017	15,004	15,004	15,006	15,011	15,0084	± 0,0035	0,00
Délkový rozměr 8 mm	C11	7,9772	7,988	7,986	7,992	7,999	7,983	7,9896	± 0,0039	0,01
Délkový rozměr 4 mm	C12	3,9766	4,033	4,021	4,042	3,980	3,989	4,0130	± 0,0171	0,04
Délkový rozměr 2 mm	C13	1,9790	2,024	2,036	2,009	1,984	2,012	2,0130	± 0,0122	0,03
Délkový rozměr 1 mm	C14	0,9792	1,001	1,025	0,992	0,985	1,010	1,0026	± 0,0098	0,02
Délkový rozměr 0,5 mm	C15	0,4808	0,507	0,551	0,480	0,416	0,502	0,4912	± 0,0309	0,01
Válec Ø45 mm	C16	45,0026	45,021	45,030	45,028	45,023	45,025	45,0254	± 0,0023	0,02
Válec Ø25 mm	C17	24,9994	25,004	25,005	24,999	24,995	25,001	25,0008	± 0,0025	0,00
Válec Ø8 mm	C18	7,9762	7,955	7,964	7,950	7,948	7,961	7,9556	± 0,0043	-0,02
Válec Ø4 mm	C19	3,9764	3,892	3,854	3,897	3,887	3,849	3,8758	± 0,0141	-0,10
Válec Ø2 mm	C20	1,9740	1,894	1,834	1,863	1,842	1,856	1,8578	± 0,0145	-0,12
Otvor Ø30 mm	C21	30,0218	X	X	X	X	X	X	± X	X
Otvor Ø15 mm	C22	15,0144	X	X	X	X	X	X	± X	X
Otvor Ø8 mm	C23	8,0152	7,923	7,933	7,950	7,954	7,918	7,9356	± 0,0100	-0,08
Otvor Ø4 mm	C24	4,0294	3,733	3,685	3,810	3,850	3,699	3,7554	± 0,0449	-0,27
Otvor Ø2 mm	C25	2,0316	X	X	X	X	X	X	± X	X
Odchýlení válcovitosti válce Ø45	C26	0,0042	0,100	0,111	0,109	0,105	0,099	0,1048	± 0,0033	0,10
Odchýlení válcovitosti otvoru Ø8	C27	0,0060	0,125	0,111	0,117	0,104	0,109	0,1132	± 0,0051	0,11
Odchýlení kruhovitosti řezu na rohu etalonu	C28	0,0034	0,024	0,012	0,025	0,036	0,021	0,0236	± 0,0054	0,02
Odchýlení rovinnosti vrchní plochy kvádra	C29	0,0010	0,017	0,022	0,019	0,024	0,022	0,0208	± 0,0017	0,02
Odchýlení rovnoběžnosti boků etalonu	C30	0,0010	0,083	0,072	0,087	0,093	0,079	0,0828	± 0,0050	0,08
Odchýlení kolmosti boků etalonu	C31	0,0060	0,050	0,056	0,062	0,067	0,052	0,0574	± 0,0044	0,05
Odchýlení sklonu úhlu 135°	C32	0,0086	0,054	0,053	0,051	0,047	0,052	0,0514	± 0,0017	0,04

Hodnoty v tabulce jsou uvedeny v milimetrech.

Příloha VI: Naměřené hodnoty na skenovaných datech (RevScan)

Prvek	Ozn.	Rozměr SMS	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření	Rozměr SCAN	Odchylka	
Rozteč 165 mm	C1	164,9988	165,062	165,096	165,120	165,070	165,041	165,0778	± 0,0192	0,08
Rozteč 110 mm	C2	109,9970	110,030	110,059	110,074	110,027	110,008	110,0396	± 0,0166	0,04
Rozteč 55 mm	C3	55,0020	55,031	55,036	55,046	55,033	55,034	55,0360	± 0,0037	0,03
Rozteč 42 mm	C4	42,0018	42,021	42,023	41,982	42,012	42,008	42,0092	± 0,0103	0,01
Rozteč 28 mm	C5	27,9992	28,008	28,015	28,002	28,010	27,997	28,0064	± 0,0044	0,01
Rozteč 14 mm	C6	14,0026	14,013	14,008	13,980	13,994	14,011	14,0012	± 0,0088	0,00
Délkový rozměr 200 mm	C7	200,1278	200,381	200,334	200,306	200,332	200,328	200,3362	± 0,0172	0,21
Délkový rozměr 100 mm	C8	100,1282	100,322	100,296	100,290	100,302	100,287	100,2994	± 0,0087	0,17
Délkový rozměr 30 mm	C9	30,0064	30,188	30,226	30,075	30,157	30,149	30,1590	± 0,0350	0,15
Délkový rozměr 15 mm	C10	15,0042	15,159	15,243	15,077	15,149	15,160	15,1576	± 0,0369	0,15
Délkový rozměr 8 mm	C11	7,9772	8,144	8,042	8,114	8,109	8,149	8,1116	± 0,0268	0,13
Délkový rozměr 4 mm	C12	3,9766	4,174	4,044	4,123	4,117	4,162	4,1240	± 0,0319	0,15
Délkový rozměr 2 mm	C13	1,9790	2,160	2,041	2,142	2,119	2,165	2,1254	± 0,0316	0,15
Délkový rozměr 1 mm	C14	0,9792	1,134	1,056	1,127	1,103	1,154	1,1148	± 0,0235	0,14
Délkový rozměr 0,5 mm	C15	0,4808	0,626	0,576	0,616	0,606	0,639	0,6126	± 0,0149	0,13
Válec Ø45 mm	C16	45,0026	45,155	45,238	45,093	45,137	45,176	45,1598	± 0,0334	0,16
Válec Ø25 mm	C17	24,9994	25,142	25,223	25,050	25,131	25,152	25,1396	± 0,0386	0,14
Válec Ø8 mm	C18	7,9762	8,104	8,177	7,968	8,118	8,110	8,0954	± 0,0482	0,12
Válec Ø4 mm	C19	3,9764	4,059	4,125	3,914	4,037	4,095	4,0460	± 0,0508	0,07
Válec Ø2 mm	C20	1,9740	2,010	2,097	1,846	1,999	2,010	1,9924	± 0,0569	0,02
Otvor Ø30 mm	C21	30,0218	X	X	X	X	X	X	± X	X
Otvor Ø15 mm	C22	15,0144	X	X	X	X	X	X	± X	X
Otvor Ø8 mm	C23	8,0152	7,782	7,945	7,831	7,827	7,798	7,8366	± 0,0400	-0,18
Otvor Ø4 mm	C24	4,0294	3,794	3,892	3,830	3,778	3,729	3,8046	± 0,0381	-0,22
Otvor Ø2 mm	C25	2,0316	X	X	X	X	X	X	± X	X
Odchýlení válcovitosti válce Ø45	C26	0,0042	0,144	0,121	0,189	0,140	0,115	0,1418	± 0,0182	0,14
Odchýlení válcovitosti otvoru Ø8	C27	0,0060	0,128	0,095	0,092	0,089	0,085	0,0978	± 0,0108	0,09
Odchýlení kruhovitosti řezu na rohu etalonu	C28	0,0034	0,066	0,043	0,069	0,049	0,013	0,0480	± 0,0141	0,04
Odchýlení rovinnosti vrchní plochy kváдру	C29	0,0010	0,071	0,067	0,071	0,069	0,061	0,0678	± 0,0026	0,07
Odchýlení rovnoběžnosti boků etalonu	C30	0,0010	0,160	0,227	0,246	0,219	0,266	0,2236	± 0,0250	0,22
Odchýlení kolmosti boků etalonu	C31	0,0060	0,134	0,212	0,259	0,193	0,189	0,1974	± 0,0282	0,19
Odchýlení sklonu úhlu 135°	C32	0,0086	0,162	0,112	0,146	0,136	0,139	0,1390	± 0,0114	0,13

Hodnoty v tabulce jsou uvedeny v milimetrech.